

CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

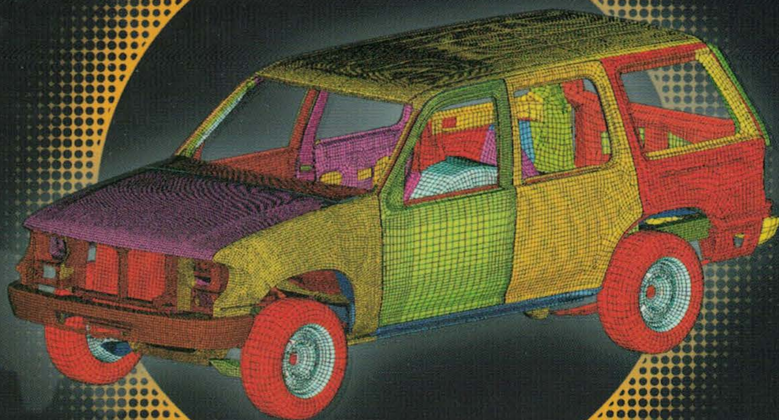
ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0联合仿真有限元分析

贺李平 肖介平 龙 凯 编著

第2版

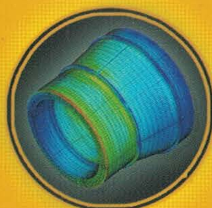
本书核心内容包含

- ANSYS高级单元技术
- 基于HyperMesh的有限元网格划分
- 有限元装配技术
- HyperMesh与ANSYS的数据传递接口
- 静力分析
- 模态分析
- 谐响应分析
- 瞬态动力学分析
- 响应谱分析
- 随机振动分析
- 几何非线性分析
- 材料非线性分析
- 接触非线性分析
- 多体刚–柔系统分析





附赠全书范例素材 CD 光盘







机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



VISIT…

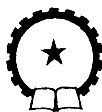
LANZAROTE Caliente.COM

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

ANSYS 14.5 & HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析

第 2 版

贺李平　肖介平　龙　凯　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书主要讲解如何利用 HyperMesh 建立高质量的有限元模型，再以 ANSYS 作为求解器来解决各类工程问题。全书共 16 章，包含了 HyperMesh 有限元网格建模技术、ANSYS 高级单元技术、装配体连接技术、静力分析、模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、响应谱分析、随机振动分析、几何非线性分析、材料非线性分析、接触非线性分析和多体刚-柔系统动力学分析等内容。作者还针对每个专题精心设计了实例。

本书可作为使用 HyperMesh 和 ANSYS 进行工程分析的工程技术人员及相关专业师生的参考用书，也可作为 HperMesh 和 ANSYS 软件的教材或培训教材。

图书在版编目（CIP）数据
ANSYS 14.5 与 HyperMesh 12.0 联合仿真有限公司元分析/贺李平，肖介平，龙凯编著. —2 版. —北京：机械工业出版社，2014.8
（CAD/CAM/CAE 工业应用丛书）
ISBN 978-7-111-47967-3
Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①贺… ②肖… ③龙… Ⅲ. ①有限元分析—应用软件
Ⅳ. ①0241.82-39
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 213050 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦
责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞
责任印制：李　洋
三河市国英印务有限公司印刷
2014 年 10 月第 2 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 21.75 印张 • 535 千字
0001－4000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-47967-3
ISBN 978-7-89405-536-1 （光盘）
定价：62.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务　网络服务
社服务中心：（010）88361066　教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294　机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649　机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203　封面无防伪标均为盗版

出 版 说 明



随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的《CAD/CAM/CAE 工程应用丛书》。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　言

有限元方法是在当今工程分析中获得最广泛应用的数值计算方法，由于它的通用性和有效性，已受到工程技术界的高度重视。如今，一大批由专业软件公司开发的商业软件（如ABAQUS、ADINA、ANSYS和NASTRAN等）已得到广泛认可和应用。

众所周知，ANSYS是当前主流的有限元分析软件之一，而HyperMesh则是十分优秀的有限元前处理工具。本书将ANSYS和HyperMesh结合起来，讲解如何利用HyperMesh建立高质量的有限元模型，再以ANSYS作为求解器来解决各类工程问题。

本书共16章，涵盖了HyperMesh有限元网格建模技术、ANSYS高级单元技术、静力学分析、动力学分析、非线性分析等内容。本书特别讲解了装配体连接技术、螺栓预紧和多体刚-柔系统动力学分析等高级技术。由于ANSYS Workbench被广泛使用，本书也讲解了利用HyperMesh为ANSYS Workbench进行前处理的方法。

本书是作者多年从事有限元分析工作的理论概括、技术积累和经验总结，特色如下。

- 内容新颖。本书是一本专门讲解ANSYS与HyperMesh联合仿真的书籍。本书基于ANSYS 14.5和HyperMesh 12.0讲解最新的建模技术、单元技术和计算方法，本书的方法也能应用于其他版本的ANSYS和HyperMesh。
- 注重方法，讲求实用。本书讲解了如何利用HyperMesh为ANSYS建立有限元模型，如何选择单元并确保其计算精度。对于每个专题，讲解了必要和关键的方法，如单元选择、单元选项设置、求解控制等关键技术。书中给出了所有实例的详细描述，只要读者细心研读并付诸实践，必能掌握正确方法，提升仿真水平。
- 内容精炼。本书的目的在于帮助读者解决实际问题，提升有限元技术应用水平。书中没有罗列ANSYS和HyperMesh软件的所有功能和详细操作步骤，只介绍最关键的建模和计算步骤，但并不影响完整性。本书立足于实际工程应用，只介绍了三维有限元分析技术，省略了平面应力和平面应变等二维问题。
- 配套一张模型文件光盘，以提高读者的学习效率。

本书主要编著工作由贺李平博士（北京无线电测量研究所）完成，参加本书编著工作的还有肖介平工程师（北京汽车研究总院有限公司）和龙凯博士（华北电力大学）。本书的编著得到北京无线电测量研究所的支持，在此深表感谢。在本书的写作过程中，家庭迎来了两个小生命，妻子和家人承担了繁重的家务工作，非常感谢他们在写作中给予的理解和支持。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正，如有疑问，可发邮件至bithlp@sina.com。

作　者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　绪论 ……1
1.1　有限元法的基本概念……1
1.2　有限元法的发展及应用……2
1.2.1　有限元法的诞生……2
1.2.2　有限元软件的发展及应用……3
1.3　ANSYS 软件的发展及应用……6
1.4　HyperMesh 软件的发展及应用……8
1.5　有限元分析的基本步骤……10
第 2 章　ANSYS 高级单元技术……11
2.1　杆单元 LINK180……11
2.1.1　杆单元的几何构型……11
2.1.2　设置单元选项……12
2.1.3　设置实常数……12
2.1.4　杆单元分析实例 1……13
2.1.5　杆单元分析实例 2……14
2.1.6　杆单元的使用建议……14
2.2　梁单元 BEAM188……15
2.2.1　梁单元的几何构型……15
2.2.2　设置单元选项……15
2.2.3　梁单元的横截面……16
2.2.4　梁单元分析实例……16
2.2.5　梁单元的使用建议……19
2.3　板壳单元 SHELL181 和 SHELL281……20
2.3.1　板壳单元的几何构型……20
2.3.2　设置单元选项……20
2.3.3　板壳单元的横截面……21
2.3.4　板壳单元分析实例 1……22
2.3.5　板壳单元分析实例 2……25
2.3.6　板壳单元的使用建议……27
2.4　实体单元 SOLID185、SOLID186 和 SOLID187……27
2.4.1　实体单元的几何构型……28
2.4.2　设置单元选项……29
2.4.3　实体单元分析实例……30
2.4.4　实体单元的使用建议……34
2.5　质量单元 MASS21……35
2.5.1　质量单元描述……36
2.5.2　设置单元选项……36
2.5.3　设置实常数……36
2.6　线性弹簧单元 COMBIN14……37
2.6.1　线性弹簧单元描述……37
2.6.2　设置单元选项……38
2.6.3　设置实常数……38
2.7　非线性弹簧单元 COMBIN39……38
2.7.1　非线性弹簧单元描述……39
2.7.2　设置单元选项……39
2.7.3　设置实常数……39
2.8　预紧力单元 PRETS179……40
2.8.1　预紧力单元描述……40
2.8.2　定义预紧力方向……41
2.9　刚性杆/梁单元 MPC184-Link/Beam……42
2.9.1　刚性杆/梁单元描述……42
2.9.2　设置单元选项……42
2.10　铰链单元 MPC184-Revolute……43
2.10.1　铰链单元描述……43
2.10.2　定义节点局部坐标系……44
2.10.3　设置单元选项……44
2.10.4　定义铰链截面……44
2.11　目标单元 TARGE170 与接触单元 CONTA173、CONTA174 和 CONTA175……45
2.12　刚性区域 CERIG……46
2.13　柔性连接 RBE3……46
第 3 章　基于 HyperMesh 的有限元网格划分……47
3.1　HyperMesh 的用户界面……47

3.2 模型导入及几何清理实例…………51
3.3 一维网格划分…………55
3.4 二维网格划分实例…………57
3.5 三维网格划分…………64
3.5.1 四面体网格划分实例…………64
3.5.2 六面体网格划分实例…………70
3.6 网格质量检查…………77
3.6.1 网格质量检查内容…………77
3.6.2 网格质量检查及编辑实例…………81
3.7 本章小结…………93
第 4 章 有限元装配技术…………94
4.1 实体-板壳-梁单元连接技术…………94
4.1.1 实体-实体连接技术…………94
4.1.2 实体-板壳连接技术…………95
4.1.3 实体-梁连接技术…………96
4.1.4 板壳-板壳连接技术…………98
4.1.5 板壳-梁连接技术…………99
4.2 螺栓连接…………101
4.2.1 实体螺栓连接模型…………101
4.2.2 刚性连接简化模型…………101
4.3 焊接…………102
4.3.1 节点耦合…………102
4.3.2 焊点…………102
4.4 轴承连接…………103
4.4.1 刚性连接…………103
4.4.2 柔性连接…………104
4.4.3 Surface-Based Constraints…………104
4.4.4 轴承连接算法对比…………105
4.5 本章小结…………106
第 5 章 加载…………107
5.1 载荷的基本概念…………107
5.2 载荷步、子步和平衡迭代…………107
5.2.1 载荷步…………107
5.2.2 子步…………108
5.2.3 平衡迭代…………108
5.3 时间的作用…………108
5.4 阶跃载荷与斜坡载荷…………109
5.5 载荷的施加…………109
第 6 章 HyperMesh 与 ANSYS 的数据传递接口…………111
6.1 HyperMesh 与 ANSYS 的接口…………111
6.2 实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 建立分析模型…………112
6.3 实例：利用 HyperMesh 为 Workbench Mechanical 进行前处理…………121
6.4 实例：HyperMesh 接触向导…………128
6.5 实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建二维接触模型…………136
6.6 实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建三维接触模型…………144
6.7 实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建梁单元…………152
6.8 本章小结…………160
第 7 章 静力分析…………161
7.1 静力分析的求解方法…………161
7.2 静力分析的基本步骤…………161
7.2.1 建立有限元网格模型…………161
7.2.2 施加边界条件及载荷…………162
7.2.3 设置求解控制选项…………162
7.2.4 求解…………163
7.2.5 查看结果…………163
7.3 静力分析实例…………163
7.4 本章小结…………167
第 8 章 模态分析…………168
8.1 模态分析的求解方法…………168
8.2 模态分析的基本步骤…………169
8.2.1 建立有限元网格模型…………169
8.2.2 施加边界条件…………169
8.2.3 设置求解控制选项…………170
8.2.4 求解…………170
8.2.5 查看结果…………171
8.3 有预应力的模态分析…………171
8.3.1 静力分析…………171
8.3.2 模态分析…………171
8.4 模态分析实例…………172
8.5 有预应力的模态分析实例…………176

8.6 本章小结 ……182
第 9 章 谐响应分析 ……183
9.1 谐响应分析的求解方法……183
9.2 谐响应分析的基本步骤……185
9.2.1 建立有限元网格模型……185
9.2.2 模态分析（可选）……185
9.2.3 设置求解控制选项……185
9.2.4 施加边界条件及载荷……186
9.2.5 求解……187
9.2.6 查看结果……187
9.3 有预应力的谐响应分析……188
9.3.1 静力分析……188
9.3.2 谐响应分析……188
9.4 谐响应分析实例……189
9.5 有预应力的谐响应分析实例……199
9.6 本章小结……202
第 10 章 瞬态动力学分析……204
10.1 瞬态动力学分析的求解方法……204
10.2 瞬态动力学分析的基本步骤……205
10.3 有预应力的瞬态动力学分析……207
10.4 瞬态动力学分析的关键技术……208
10.4.1 积分时间步长……208
10.4.2 自动时间步长……210
10.4.3 初始条件……210
10.4.4 阻尼……212
10.5 瞬态动力学分析实例……213
10.6 有预应力的瞬态动力学分析实例……221
10.7 本章小结……225
第 11 章 响应谱分析……227
11.1 响应谱分析的类型……227
11.2 单点响应谱分析的基本步骤……228
11.3 多点响应谱分析的基本步骤……229
11.4 单点响应谱分析实例……230
11.5 多点响应谱分析实例……241
11.6 本章小结……246
第 12 章 随机振动分析……247
12.1 随机振动分析的类型……247
12.2 随机过程的数字特征……247
12.3 随机振动分析的基本步骤……248
12.4 单点随机振动分析实例……251
12.5 多点随机振动分析实例……259
12.6 本章小结……263
第 13 章 几何非线性分析……265
13.1 几何非线性涉及的问题及处理方法……265
13.1.1 小应变大位移（或大转动）……265
13.1.2 大应变（包含大位移或大转动）……265
13.1.3 应力刚化效应……266
13.1.4 载荷和位移方向……266
13.1.5 有限元网格模型的特殊要求……266
13.1.6 几何非线性求解控制……267
13.1.7 监视求解过程……267
13.2 几何非线性分析实例……267
13.3 本章小结……272
第 14 章 材料非线性分析……273
14.1 弹塑性涉及的问题及处理方法……273
14.1.1 弹塑性……273
14.1.2 Bauschinger 效应……274
14.1.3 静水压力……274
14.1.4 率相关性……274
14.1.5 屈服准则……274
14.1.6 流动准则……275
14.1.7 强化准则……275
14.1.8 弹塑性材料的简化模型……276
14.1.9 有限元网格模型的特殊要求……276
14.1.10 弹塑性求解控制……276
14.2 超弹性涉及的问题及处理方法……276
14.2.1 超弹性……276

14.2.2 超弹性材料的简化模型…………277
14.2.3 有限元网格模型的特殊要求……277
14.2.4 单元技术的特殊要求……………277
14.2.5 超弹性求解控制……………………278
14.3 弹塑性材料非线性分析
实例……………………………………278
14.4 超弹性材料非线性分析
实例……………………………………283
14.5 本章小结……………………………288
第 15 章 接触非线性分析…………………289
15.1 面-面接触……………………………289
15.1.1 建立面-面接触模型………………289
15.1.2 面-面接触分析的关键技术………290
15.2 点-面接触……………………………293
15.2.1 建立点-面接触模型………………293
15.2.2 点-面接触分析的关键技术………294
15.3 接触非线性分析
实例 1：过盈配合…………………294
15.4 接触非线性分析
实例 2：钢球跌落…………………302
15.5 接触非线性分析
实例 3：钢球跌落…………………309
15.6 接触非线性分析
实例 4：螺栓预紧…………………313
15.7 本章小结……………………………318
第 16 章 多体刚-柔系统分析……………320
16.1 多体刚-柔系统的建模技术……320
16.1.1 建立柔体模型………………………320
16.1.2 建立刚体模型………………………320
16.1.3 建立连接模型………………………321
16.2 多体刚-柔系统分析求解
控制……………………………………321
16.3 多体刚-柔系统分析实例………321
16.4 本章小结……………………………336
参考文献……………………………………337

第 1 章　绪　　论



1.1　有限元法的基本概念

一般情况下，工程问题均可表达为数学模型。大多数工程问题的数学模型，都是针对特定的系统应用自然界的基本定律和原理，推导出来的微分方程组。一般不能得到精确解，而需要借助数值方法来近似求解。

有限元方法（Finite Element Method，FEM）是在当今工程分析中应用最广泛的数值计算方法。它具备的通用性和有效性，已使它受到工程技术界的高度重视。有限元方法的基本思想是用较简单的问题代替复杂问题再求解。它将求解域看成是由许多称为“单元”的小的互连子域组成，对每一单元假定一个近似解，然后推导并求解这个域总的满足条件（如结构的平衡条件），从而得到原问题的解。用于建立有限元方程的变分原理或加权余量法在数学上已证明是微分方程和边界条件的等效积分形式。因此，有限元解可收敛于原数学模型的精确解。

从有限元理论的角度看，有限元分析（Finite Element Analysis，FEA）可分为 4 个步骤，即：结构离散化、单元分析、整体分析以及数值求解。

（1）结构离散化

结构离散化即网格划分，是将连续体离散为有限个单元，并通过它们边界上的节点相互连接成为组合体。图 1-1 表示采用四边形和三角形单元将连续体离散化的图形。各个单元通过它们的角节点相互连接。

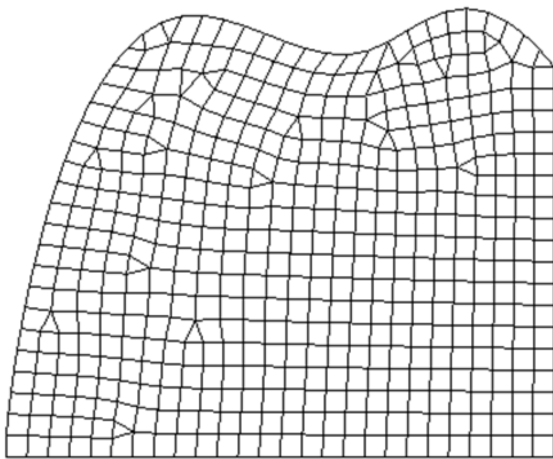


图 1-1　连续体的有限单元离散

（2）单元分析

单元分析是建立单元节点力与节点位移之间的关系，即建立单元的刚度方程

$$[k]^e\{u\}^e=\{f\}^e \tag{1-1}$$

式中，$[k]^e$ 为单元刚度矩阵，与单元内部的材料、变形分布有关；$\{u\}^e$ 为单元节点位移向量；$\{f\}^e$ 为单元节点力向量。

（3）整体分析

整体分析即单元组合，是将式（1-1）描述的单元刚度方程应用到所有单元，并将它们组合起来，以建立整体刚度方程

$$[K]\{U\}=\{F\} \tag{1-2}$$

式中，$[K]$为整体系统刚度矩阵；$\{U\}$为整体系统节点位移向量；$\{F\}$为整体系统节点力向量。

（4）数值求解

整体刚度方程（1-2）是线性代数方程组。在引入边界条件之后，即可采用直接解法（如Gauss 消元法、三角分解法、波前法等）或迭代解法（如超松弛迭代法、共轭梯度法等）进行求解，从而得到各节点位移，再由几何方程和本构方程进一步得到各单元内部应变及内部应力。

1.2　有限元法的发展及应用

1.2.1　有限元法的诞生

有限元的思想早在几个世纪前就已经产生并得到了应用。例如，用多边形（有限个直线单元）逼近圆来求得圆的周长。但作为一种方法而被提出，则是发生在 20 世纪的事。从应用数学的角度看，有限元法的基本思想可以追溯到 Courant 在 1943 年发表的论文《Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations》[1]。他将一系列三角形区域上的分片连续函数和最小位能原理相结合，来求解 St.Venant 扭转问题。由于当时计算机尚未出现，这篇论文并没有引起应有的关注。此后，许多应用数学家、物理学家和工程师分别从不同角度对有限元法的离散理论、方法及应用进行了研究。有限元法的实际应用是随着电子计算机的出现而开始的。1956 年，Turner 和 Clough 等人发表了名为《Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures》的论文[2]。他们将钢架分析中的位移法推广到弹性力学平面问题，并用于飞机结构的分析。他们首次给出了用三角形单元求解平面应力问题的正确解答。三角形单元的特性矩阵和结构的求解方程是由弹性理论的方程通过直接刚度法确定的。他们的工作开始了利用电子计算机求解复杂弹性力学问题的新阶段，一般认为这是工程学界有限元法的开端。1960 年，Clough 发表了另一篇名为《The Finite Element Method in Plane Stress Analysis》的论文[3]。他进一步求解了弹性力学平面问题，并将该方法的应用范围扩展到飞机以外的土木工程。他在文中正式提出“有限元法”（Finite Element Method）的名称，使人们更清楚地认识到有限元法的特性和功效。

由此之后，有限元法的理论迅速发展起来，并被广泛应用于各种力学问题，成为分析大型、复杂工程结构的强有力手段。随着计算机的迅速发展，有限元法中人工难以完成的大量

计算工作能够由计算机来实现并快速地完成。因此，可以说，计算机的发展很大程度上促进了有限元法的建立和发展。

1.2.2 有限元软件的发展及应用

有限元法是通过计算机实现的。有限元软件封装了有限元的理论、单元形式和算法，直接反映了有限元技术的发展和应用。下面对有限元软件的发展历程进行简要回顾[4-6]。

1. 有限元软件的起源期

1963 年，Wilson 和 Clough 为了教授结构静力与动力分析而开发了 SMIS（Symbolic Matrix Interpretive System），其目的是为了弥补传统手工计算方法和结构分析矩阵法之间的隔阂。1969 年，Wilson 在第一代程序的基础上开发了第二代线性有限元分析程序，即著名的 SAP（Structural Analysis Program）。这也是我国最早引入的一个线性有限元程序，对我国有限元技术的发展和工程应用曾经发挥了巨大的促进作用。此后，随着研究工作的深入，非线性有限元程序 NONSAP 被开发出来，它主要采用隐式积分进行平衡迭代和瞬态问题的求解。

同样是 1963 年，MacNeal 和 Schwendler 联手创办了 MSC 公司。他们开发的第一个软件名为 SADSAM（Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods），即数字仿真模拟法结构分析。

提到 MSC 公司，就想到与其有着不解渊源的美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）。当年，美国为了能够在与前苏联之间的太空竞赛中取得优胜而成立了 NASA。为了满足宇航工业对结构分析的迫切需求，NASA 于 1966 年提出了开发世界上第一套泛用型的有限元分析软件 NASTRAN（NASA Structural Analysis Program）的计划，MSC 公司则参与了整个 NASTRAN 程序的开发过程。1969 年，NASA 推出了其第一个 NASTRAN 版本，称为 COSMIC.Nastran。之后，MSC 公司继续改良 NASTRAN 程序并在 1971 年推出 MSC.Nastran。

另一个与 NASA 结缘的是 SDRC 公司，SDRC 公司在 NASA 的支持下成立于 1967 年，并于 1968 年发布了世界上第一个动力学测试及模态分析软件包，1971 年推出了商业有限元分析软件 Supertab。

1969 年，任教于 Brown 大学的 Marcal 创建了 MARC 公司，并推出了第一个商业非线性有限元程序 MARC。虽然 MARC 在 1999 年被 MSC 公司收购，但其对有限元软件的发展起到了决定性的推动作用，至今，在 MSC 的分析体系中依然有着 MARC 程序的身影。

1970 年，Swanson 建立了自己的公司 Swanson Analysis Systems Inc.（SASI，1994 年与 TA Associates 重组为 ANSYS 公司），并发布了商用软件 ANSYS。其实早在 1963 年 Swanson 任职于 Westinghouse 公司的太空核子实验室时，就已经为核子反应火箭的应力分析编写了名为 STASYS （Structural Analysis System）的计算程序，即 ANSYS 软件的前身。

2. 有限元软件的发展期

进入 20 世纪 70 年代后，随着有限元理论的发展，计算机辅助工程（Computer Aided Engineering，CAE）技术也逐渐进入了蓬勃发展的时期。一方面，MSC、SDRC、ANSYS 三大 CAE 公司先后组建，并且致力于大型商业 CAE 软件的研究与开发；另一方面，更多新的 CAE 软件迅速出现，为 CAE 市场的繁荣注入了新鲜血液。

Hibbitt 是对有限元软件的杰出贡献者之一，他是 Marcal 在 Brown 大学的博士生。博士毕业后，Hibbitt 在 MARC 公司工作到 1977 年，随后与 Karlsson 和 Sorenson 于 1978 年共同建立了 HKS 公司，并推出了 ABAQUS 软件。该程序是能够引导研究人员自主增加用户单元和材料模型的早期有限元程序之一，因此受到科研人员和工程师们的青睐，对当时的有限元软件行业带来了实质性的冲击。

另一位对有限元软件做出重大贡献的人是 Bathe，他是 Wilson 在 Berkeley 大学的博士生，之后任教于 MIT。1975 年，Bathe 在 NONSAP 的基础上发表了著名的非线性求解器 ADINA（Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis）。在 1986 年 ADINA R&D Inc.公司成立以前，ADINA 软件的源代码是公开的，即著名的 ADINA81 版和 ADINA84 版本的 FORTRAN 源程序，后期的很多有限元软件都是根据这个源程序编写的。

Hallquist 是 CAE 历史中的另一个关键人物。他于 1976 年发布了显式有限元程序 DYNA，同时吸取前人的成果，并与 Berkeley 的研究人员紧密合作，在 DYNA 的基础上完成了 DYNA2D 和 DYNA3D 程序。现在我们熟知的众多软件（如 PAM-CRASH，MSC.Dytran，ANSYS/LS-DYNA）中都可以发现 DYNA 的踪迹，因此 DYNA 系列也被公认为显式有限元程序的鼻祖。

1984 年，ALGOR 公司成立。在购买了 SAP5 源程序和 ViziCAD 图像处理软件之后，推出了 ALGOR FEAS（Finite Element Analysis System）。

随着有限元技术的日趋成熟，市场上不断有新的公司成立并推出 CAE 软件。1983 年，AAC 公司成立，推出 COMET 程序，主要用于噪声及结构噪声优化分析等领域。随后，Computer Aided Design Software Inc.公司推出提供线性静态、动态及热分析的 PolyFEM 软件包。1988 年，Flomerics 公司成立，推出用于空气流及热传递的分析程序。同时期还有多家软件公司投入专业 CAE 程序的研发。由此，CAE 分析由力学领域逐渐扩展到了热学、流体和电磁领域，并且已经发展到多场耦合领域。可以说，有限元技术经过数十年的研究发展，其应用范围与研究对象发生了翻天覆地的变化。

3. 有限元软件的成熟期

自 20 世纪 90 年代至今是 CAE 技术的成熟期。这一时期的 CAE 领域呈现出了大鱼吃小鱼的市场局面，大的软件公司为了提升自己的分析技术、拓宽自己的应用范围寻找机会收购、并购小的、专业的软件商，因此 CAE 软件的功能得到了极大的提升。

MSC 公司作为最早成立的 CAE 公司，先后通过开发、并购，已经把数个 CAE 程序集成到其分析体系中。目前 MSC 公司旗下拥有十几个产品，如 NASTRAN、PATRAN、MARC、ADAMS、DYTRAN 和 EASY5 等，覆盖了线性分析、非线性分析、显式非线性分析、流体动力学分析和流-固耦合分析等领域。另外，MSC 公司还推出了多学科方案（MD），把以上的诸多产品集成为单一框架以解决多学科协同仿真的问题。

SDRC 公司把其有限元程序 Supertab 并入到 I-DEAS 软件中，并加入耐用性、NVH、优化与灵敏度、电子系统冷却、热分析等技术，且将有限元技术与实验技术结合起来，开发了实验信号处理、实验与分析相关等技术。2001 年，EDS 公司收购了 SDRC，并将其与 UGS 合并重组。SDRC 的有限元分析程序演变成了 NX 中的 I-DEAS NX Simulation，与 NX NASTRAN（源于 MSC.Nastran）一起成为了 NX 产品生命周期中仿真分析的重要组成部分。

ANSYS 公司经过一连串的并购与自身壮大后，把其产品扩展为 ANSYS Mechanical 系列、ANSYS CFD（FLUENT/CFX）系列、ANSYS Ansoft 系列等。2002 年，ANSYS 推出了软件集成环境平台 ANSYS Workbench Environment（AWE）。经过持续改进之后，ANSYS Workbench 以项目流程图的方式，将各种数值模拟方法集成到统一平台中，实现了不同软件之间的无缝连接。由此，ANSYS 塑造了一个体系规模庞大、产品线极为丰富的仿真平台，在结构分析、电磁场分析、流体动力学分析、多物理场耦合分析、协同技术等方面都提供了完善的解决方案。

CAE 市场的其他厂商也发生了不少的并购和重组，一些新的厂商也逐渐崭露头角。2002 年，HKS 公司改名为 ABAQUS，并于 2005 年被法国达索公司收购，2007 年更名为 SIMULIA。凭借强大的非线性计算能力，ABAQUS 软件在激烈的市场竞争中占据一席之地；以前后处理技术而进入 CAE 领域的 Altair 公司，其 HyperMesh 软件自诞生之日起就备受业界关注，而围绕前后处理建立起来的 HyperWorks 软件，已经成为了现在市场上很有竞争力的软件；LMS 也是一个比较有特色的 CAE 软件公司，其软件的分析集 1D、3D、“试验”于一身，不仅可以加速虚拟仿真，还能使仿真结果更准确可靠；COMSOL 则是以多物理场耦合仿真开辟出了一片新天地，为其自身的发展、也为 CAE 技术的发展拨开了迷雾。

另外，在市场中占有一定份额的还有 CAE 前处理软件 ANSA，结构优化软件 TOSCA，流体仿真软件 PHOENICS、NUMECA、STAR-CD，铸造仿真软件 ProCAST、FLOW-3D、MAGMA SOFT 等一批专业 CAE 分析软件。

4. 我国有限元软件的发展与现状

我国的力学工作者为有限元方法的初期发展做出了许多贡献，其中比较著名的有陈伯屏（结构矩阵分析方法）、钱令希（余能原理）、钱伟长（广义变分原理）、胡海昌（广义变分原理）、冯康（有限单元法理论）。遗憾的是，由于当时环境所致，我国有限元方法的研究工作受到阻碍，有限元理论的发展也逐渐与国外拉开了距离。

20 世纪 60 年代初期，我国的老一辈计算科学家较早地将计算机应用于土木、建筑和机械工程领域。当时黄玉珊教授就提出了“小展弦比机翼薄壁结构的直接设计法”和“力法-应力设计法”。而在 70 年代初期，钱令希教授发表了《结构力学中的最优化设计理论与方法的近代发展》。这些理论和方法都为国内的有限元技术指明了方向。

1964 年初，崔俊芝院士研制出国内第一个平面问题通用有限元程序，解决了刘家峡大坝的复杂应力分析问题。60 年代到 70 年代，国内的有限元软件诞生之后，曾计算过数十个大型工程，应用于水利、电力、机械、航空、建筑等多个领域。

70 年代中期，大连理工大学研制了有限元软件 JEFIX；航空工业部研制了 HAJIF 系列程序。80 年代中期，北京大学的袁明武教授通过对美国 SAP 软件的移植和重大改造，研制出了适合我国应用的 SAP84；北京农业大学的李明瑞教授研发了 FEM 软件；建筑科学研究院研制了“BDP-建筑工程设计软件包”；中国科学院开发了 FEPS、SEFEM；航空工业总公司开发了飞机结构多约束优化设计系统 YIDOYU。

90 年代之后，大批国外 CAE 软件涌入国内市场，遍及各个领域。国外的专家则深入到大学、科研院所、企业与工厂，展示他们的 CAE 技术、系统功能及使用技巧，使得国内 CAE 软件受到强烈打压。同时，由于在对直接为先进装备制造业服务的 CAE 软件核心技术的认识

上产生了偏差：CAE 既不属于基础科学，又不属于科技攻关，故而失去了必要的支持，使其发展举步维艰，以至于在 20 世纪的最后十几年，国内 CAE 自主创新的步伐已经非常缓慢，也逐渐地拉开了与国外 CAE 软件的距离。

进入 21 世纪后，虽然国外 CAE 软件占据市场主流的现状短时间内已经无法撼动，但国内具有自主知识产权的 CAE 软件也逐渐市场化，并获得了一定的发展。北京飞箭软件有限公司推出了 FEPG；郑州机械研究所推出了紫瑞 CAE；大连理工大学开发了 CAE 软件 Adopt.Smart；吉林大学开发了针对汽车结构的 KMAS 软件系统；华中科技大学针对铸造成型开发了华铸 CAE 软件；清华大学、上海交大在注塑成型 CAE 领域也推出了相应的分析软件。

虽然国内 CAE 自主研发之路历经艰辛，但是广大专家学者用锲而不舍的战斗精神顽强地生存了下来。尤其是在近几年，数字化产品设计的概念逐渐深入人心，国内高校的技术研究和应用水平不断提高，有限元技术已经为广大企业所认可。随着国家对发展自主 CAE 平台愈发重视，国内 CAE 的研究已经逐渐走出低迷状态，获得了一定的发展。而且值得注意的是，有限元技术不再仅仅停留在高校中，而是更多地走向了企业。同时，更多使用方便、操作简单的专用分析软件也得到了广泛应用。

1.3 ANSYS 软件的发展及应用

ANSYS 软件由美国 ANSYS 公司（由 John Swanson 博士创建于 1970 年）开发，是融结构分析、流体分析、电磁分析、传热分析于一体的大型通用有限元分析软件。经过 40 多年的发展，ANSYS 从最初的版本发展到现在的 ANSYS 15.0，其程序已经有了很大的变化。早期的 ANSYS 只提供了热分析及线性结构分析功能。如今，ANSYS 的分析功能已覆盖了自然界的四种场：应力、应变场（结构分析）、温度场（热分析）、流场（流体动力学分析）和电磁场（电磁场分析），其应用领域涵盖了航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统和运动器械等行业。

Mechanical APDL 是 ANSYS 的经典界面（图 1-2），通常所说的 ANSYS 指的就是这个经典界面。在这个界面可完成各类分析的建模、计算和后处理。APDL（ANSYS Parametric Design Language，ANSYS 参数化设计语言）是一种类似 FORTRAN 的解释性语言，提供一般程序语言的功能，如参数、宏、标量、向量、矩阵运算、分支、循环、重复以及访问 ANSYS 有限元数据库等。利用 ANSYS 的程序语言组织管理 ANSYS 的有限元分析命令，就可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理结果的显示，从而实现参数化有限元分析的全过程。这也是 ANSYS 批处理分析的最高技术。在参数化的分析过程中可以简单地修改其中的参数达到反复分析各种尺寸、不同材料、不同载荷大小的多种设计方案，极大地提高分析效率，减少分析成本。

尽管 Mechanical APDL 提供了参数化建模和分析的功能，但在实际工程中的应用并非易事。一方面，学习 Mechanical APDL 需要较多的时间和精力；另一方面，Mechanical APDL 处理复杂结构或装配体时十分烦琐。因此，它无法满足结构工程师的需求。

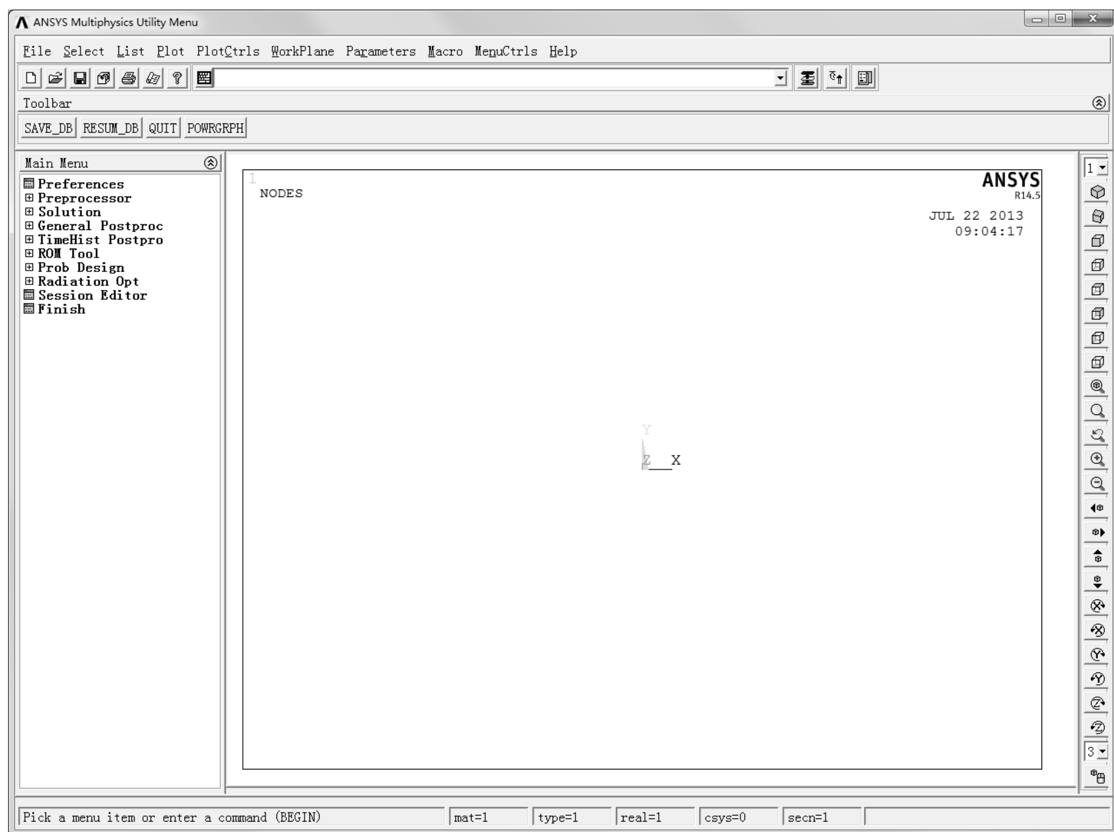


图 1-2 ANSYS 的经典界面

Mechanical 是 ANSYS 推出的新一代机械分析软件，包含结构分析、热分析及电磁分析模块，已集成到 Workbench 平台。与 Mechanical APDL 不同的是，Mechanical 将各分析类型封装成不同的分析系统（Analysis Systems），如静力分析（Static Structural）、模态分析（Modal）、瞬态动力学分析（Transient Structural）、稳态热分析（Steady-State Thermal）等。对于每个分析系统，Mechanical 规范了分析步骤，并简化了操作方法。例如，Static Structural 分析系统由 7 个步骤组成，即定义分析类型（Static Strutural）、定义材料（Engineering Data）、建立几何（Geometry）、建立有限元模型（Model）、求解控制（Setup）、求解（Solution）和后处理（Results），如图 1-3 所示。

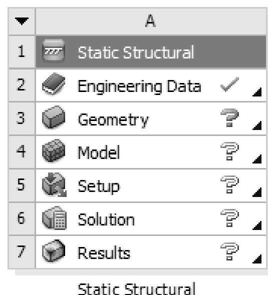


图 1-3 Static Structural 分析系统

从功能上来说，Mechanical APDL 和 Mechanical 都能独立完成有限元分析，但前者更像是可编程的求解器，操作灵活，功能强大，适合高级用户使用；后者类似专家系统，界面友好，操作简单，适合普通用户做快速分析。

1.4 HyperMesh 软件的发展及应用

在现代机械装备研发过程中，有限元模型的规模越来越大，网格越来越精细，模型管理越来越复杂，而激烈的市场竞争又要求研发周期不断缩短，投放市场时间不断提前。一般来说，CAE 工程师 80%的时间都花费在有限元模型的建立和修改上，因此，传统的有限元前处理器已经远远不能满足这些新的需求。一个功能强大、使用方便、能够与众多计算机辅助设计（Computer Aided Design，CAD）系统和有限元求解器进行数据交换的有限元前处理工具，对于提高有限元分析工作的质量和效率具有十分重要的意义。

HyperMesh 是美国 Altair 公司（创建于 1985 年）开发的有限元前处理软件，它提供了高度交互的可视化环境，帮助用户建立产品的有限元模型。Altair 公司在 1989 年发布了 HyperMesh，并很快得到汽车行业的认同。早期的 HyperMesh 就可以在个人计算机上运行，只占用极少的内存，运行速度很快，并在处理大模型（当时指 1000～15 000 个单元的模型）时表现优秀。在其他软件还要求用户输入一大堆命令的时候，HyperMesh 就已经使用鼠标和屏幕操作与用户交互了。从第 2 个版本开始，HyperMesh 就可以导入多种几何曲面，并形成了与现在的软件相似的面板和菜单系统。从第 8 个版本开始，HyperMesh 已将用户界面向 Windows 风格转变，增加了浏览器、工具栏和菜单等。在最新的版本（HyperMesh 12.0）中，HyperMesh 提高了在 CAE 流程自动化方面的核心竞争力。

HyperMesh 是一个杰出的有限元前处理平台，它提供了全面的 CAD 系统和 CAE 求解器的接口，并且支持用户自定义，从而可以与任何仿真环境无缝集成。HyperMesh 强大的几何清理功能可以用于修正几何模型中的错误，修改几何模型，从而提升建模效率；高质量、高效率的网格划分技术可以完成杆、梁、板壳、四面体和六面体网格的自动和半自动划分，大大简化了对复杂几何进行仿真建模的过程；先进的网格变形（Morphing）技术允许用户直接更改现有网格，实现新的设计，无需重构几何模型，从而提高设计开发效率；功能强大的模型树视图能轻松应对各种大模型的要素显示和分级管理需要，特别适合复杂机械装备的整体精细化建模。HyperMesh 的这些特点，大大提高了 CAE 建模的效率和质量，允许工程师把主要精力放在对产品本身性能的研究和改进上，从而大大缩短了整个设计周期。

与其他的有限元前处理器比较，HyperMesh 的图形用户界面易于使用，特别是它支持直接读取已有的 CAD 几何模型，如 CATIA、Pro/E、SolidWorks、UG 等，不需要任何其他数据转换，从而尽可能避免数据丢失或者几何缺陷。另一方面，它支持各种主流的 CAE 软件，如 ABAQUS、ANSYS、CFX、FLUENT、LS-DYNA、MARC、NASTRAN、OptiStruct、PAM-CRASH、RADIOSS、STAR-CD 等。利用 HyperMesh 建立网格模型后，可以直接把计算模型转化成不同的求解器格式文件，从而利用相应的求解器进行计算，这使得 HyperMesh 可以作为企业统一的 CAE 前处理平台。

图 1-4～图 1-6 为 HyperMesh 建立的高质量的有限元模型。

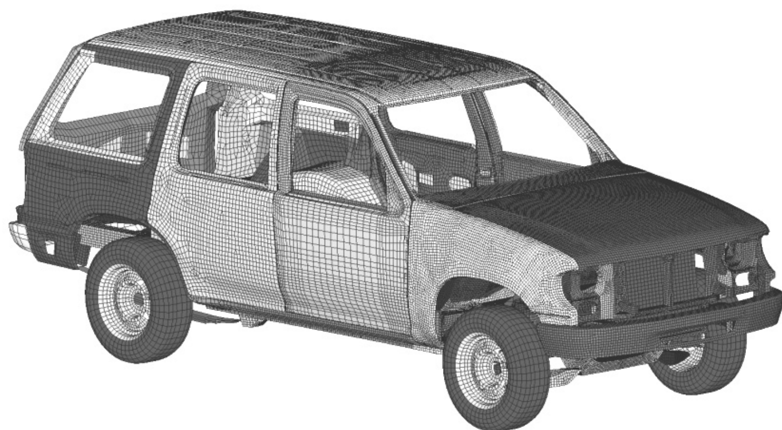


图 1-4 汽车整车有限元模型

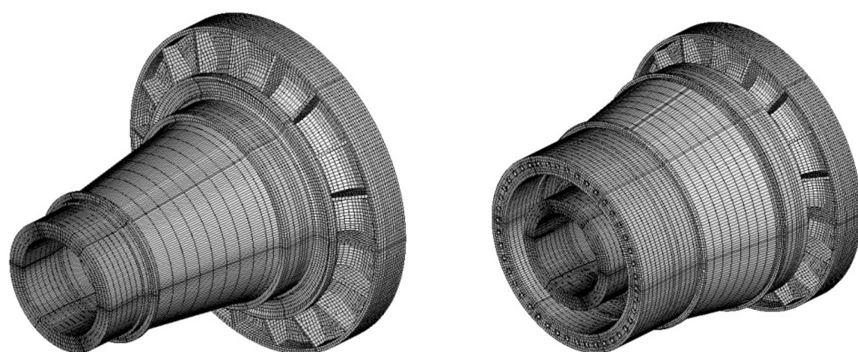


图 1-5 电机有限元模型

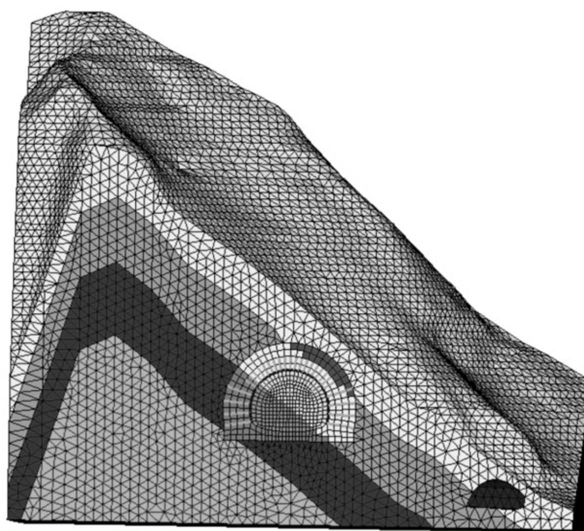


图 1-6 隧道有限元模型

1.5 有限元分析的基本步骤

本书重点介绍基于 ANSYS Mechanical APDL 与 HyperMesh 的有限元分析技术。从使用有限元软件的角度看，有限元分析可分为三个步骤，即有限元分析的前处理、计算和后处理。

（1）前处理

前处理由 HyperMesh 完成，其过程包括 CAD 模型导入、CAD 模型处理、网格划分、材料设置、单元设置、边界条件设置、求解控制等内容。

（2）计算

将 HyperMesh 生成的模型文件直接导入 ANSYS，进行必要的求解控制，提交计算。

（3）后处理

采用 ANSYS 后处理器（POST1/POST26）查看计算结果，并对结果进行分析、评估，从而做出相应的改进或优化。对于 ANSYS 13.0 及以下版本，也可采用 Altair 公司开发的专业后处理器 HyperView 12.0 进行后处理。

对于 ANSYS Workbench Mechanical，也可以利用 HyperMesh 进行前处理，将于第 6.3 节进行详细介绍。

第 2 章　ANSYS 高级单元技术

单元技术是有限元分析的核心技术，它直接决定了仿真分析的准确度。ANSYS 提供了广泛的单元[7]，其庞大的单元库为用户提供了一套强有力的工具以解决不同类型的问题。准确理解并正确使用合适的单元建造有限元模型，对于解决实际问题至关重要，也是提升仿真水平的关键。

本章基于结构分析，详细介绍了 ANSYS 最重要的单元技术，并给出了使用建议。这些单元可以满足常规的结构分析，它们包括杆单元 LINK180，梁单元 BEAM188，板壳单元 SHELL181 和 SHELL281，实体单元 SOLID185、SOLID186 和 SOLID187，质量单元 MASS21，弹簧单元 COMBIN14 和 COMBIN39，预紧力单元 PRETS179，刚性杆/梁单元 MPC184-Link/Beam，铰链单元 MPC184-Revolute，目标单元 TARGE170，接触单元 CONTA173、CONTA174 和 CONTA175，刚性区域 CERIG，柔性连接 RBE3。

2.1　杆单元 LINK180

杆是工程中常见的基本构件，它的截面尺寸远小于长度，常采用销钉或球形铰链连接。杆通常被认为是二力杆，即只承受轴向拉力或压力，不承受弯矩和扭矩。

在 ANSYS 中，LINK180 单元（三维两节点杆单元）适用于大多数的工程问题。根据具体情况，该单元可以被看做桁架单元、索单元、链杆单元、弹簧单元等。LINK180 是一个轴向拉伸/压缩单元，每个节点具有 3 个自由度，即 3 个平动自由度。该单元为一阶插值单元，因此在杆上具有相同的应变和应力。LINK180 单元具有塑性、蠕变、旋转、大变形和大应变功能，支持弹性、各向同性强化塑性、随动强化塑性、Hill 各向异性塑性、Chaboche 非线性强化塑性和蠕变材料定义。

2.1.1　杆单元的几何构型

图 2-1 为 LINK180 单元的几何构型。定义 LINK180 单元只需两个节点：I 和 J。由图 2-1 可知，节点 I 到节点 J 定义了单元的 x 轴方向。

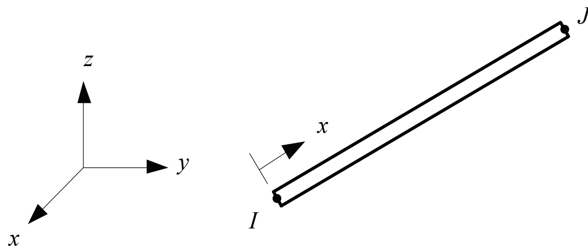


图 2-1　LINK180 单元的几何构型

2.1.2 设置单元选项

图 2-2 为 LINK180 element type options 对话框。LINK180 单元只有一个单元选项 K2，用来定义单元横截面的缩放比例（使用时必须开启大变形选项）。它包括两种方式：执行不可压缩性（K2=0, Func of Strech），即单元横截面随着轴向伸缩发生变化，保持单元体积不变，这适用于弹塑性材料，是默认选项；假定横截面为刚性（K2=1, Rigid （classic））。

一般不必设置 LINK180 的单元选项，采用默认选项即可。

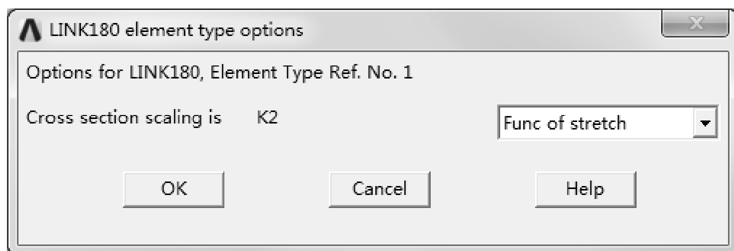


图 2-2 LINK180 element type options 对话框

2.1.3 设置实常数

LINK180 单元的实常数用于定义杆的截面面积（AREA）、附加质量（ADDMAS）和轴力选项（TENSKEY），如图 2-3 所示。通常只需定义单元截面面积 AREA。

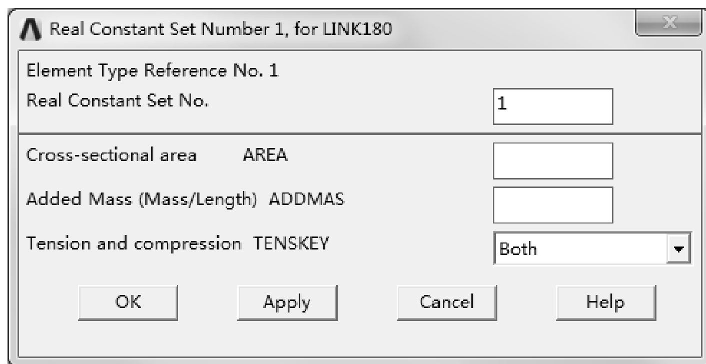


图 2-3 Real Constant Set Number1, for LINK180 对话框

单元质量可由材料密度定义（泊松比不影响计算结果），而不必定义实常数 ADDMAS，否则，ANSYS 将考虑所有质量并相加。

LINK180 单元的第 3 个实常数 TENSKEY 用于定义杆的轴力选项，它包括 3 种方式：支持拉伸和压缩（Both，命令流赋值为 0），为默认选项；仅受拉（Tension only，命令流赋值为 1）；仅受压（Compress only，命令流赋值为-1）。ANSYS 14.5 可采用 GUI 方式定义 TENSKEY，需要注意的是，若要模拟仅受拉结构（如绳索等）或仅受压结构（如轴承等），还必须打开大变形选项，采用非线性计算。

2.1.4 杆单元分析实例 1

杆的两端固定约束，中部节点 C 被强制拉伸ΔL，如图 2-4 所示。求杆两端的约束反力，并与有限元解对比。

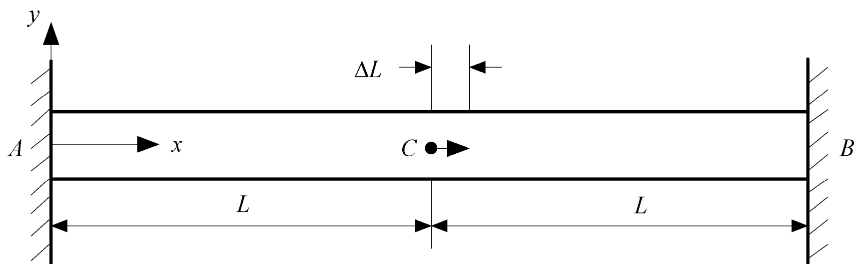


图 2-4　两端固定约束的杆

将 AB 杆分为 AC、CB 两段。AC、CB 杆的轴向力 F（即杆两端的约束反力，为$-x$ 方向）由下式给出：

$$F = S\sigma \tag{2-1}$$

式中，S 为杆的截面面积；σ 为应力。

在弹性阶段，应力σ 和应变ε 服从胡克定律：

$$\sigma = E\varepsilon \tag{2-2}$$

式中，E 为杨氏模量。

杆件的应变可由下式表示：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{2-3}$$

式中，L 为 AC、CB 杆的长度。

结合式（2-1）～式（2-3），有

$$F = \left(\frac{SE}{L}\right)\Delta L \tag{2-4}$$

令 L=100mm，ΔL=5mm，S=100mm^2，E=10MPa，并将参数代入式（2-4），即可求出杆两端的约束反力 F，列于表 2-1 中。为方便与有限元解进行比较，表 2-1 也列出了有限元解。

表 2-1　有限元解与理论解的对比

反　　力	理　论　解	有　限　元　解	误差（%）
A 点/N	50	50	0
B 点/N	50	50	0

计算及结果说明：

1）AC 杆受拉，CB 杆受压，且应变相等，故所求反力相同，方向为$-x$ 方向。

2）有限元模型为两个杆单元（LINK180），即 AC 杆与 CB 杆。

3）在小变形情形下，不考虑杆件横截面面积的变化，即杆件的刚度不变，有限元解与理

论解能够精确吻合。

2.1.5 杆单元分析实例 2

设第 2.1.4 节中的 *AB* 杆为仅受拉杆件（如绳索等），同时考虑大变形效应，求解杆两端的约束反力，并与有限元解对比。

由于 *AB* 杆为仅受拉杆件，且 *CB* 杆受压，则 *B* 端反力为 0。

考虑大变形效应时，*AC* 杆的拉伸将引起截面面积的收缩，但认为杆件体积不发生变化，则 *A* 端反力 *F* 由下式表示：

$$F = \frac{LE\sigma}{L + \Delta L} \tag{2-5}$$

应力 σ 和真实应变 ε' 服从胡克定律：

$$\sigma = E\varepsilon' \tag{2-6}$$

真实应变 ε' 可由下式表示：

$$\varepsilon' = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \tag{2-7}$$

结合式（2-5）～式（2-7），有

$$F = \frac{LSE}{L}\ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \tag{2-8}$$

代入数据，即可求出 *A* 端反力 *F*，列于表 2-2 中。为方便与有限元解进行比较，表 2-2 也列出了有限元解。

表 2-2　有限元解与理论解的对比

反　　力	理　论　解	有 限 元 解	误差（%）
A 点/N	46.47	46.47	0
B 点/N	0	0	0

计算及结果说明：

1）有限元模型为两个杆单元，即 *AC* 杆与 *CB* 杆，通过设置 LINK180 单元的第 3 个实常数 TENSKEY 为 Tension only（命令流赋值为 1），定义仅受拉杆件，同时必须打开大变形选项，采用非线性计算。

2）在大变形情形下，*AC* 杆由于拉伸而引起横截面面积的收缩，进而减小了轴向刚度，故减小了 *A* 点的反力（46.47<50）。

3）在大变形情形下，有限元解与理论解能够精确吻合。

2.1.6 杆单元的使用建议

1）杆单元是一种理想的模型，仅需一个单元即可获得精确解，十分适合模拟杆件结构。

2）新版的 ANSYS 增强了 LINK180 单元功能。若要模拟仅受拉结构（如绳索等）或仅

受压结构（如轴承等），则需定义LINK180单元的第3个实常数TENSKEY（可通过ANSYS 14.5的GUI方式或HyperMesh定义）：TENSKEY=1（Tension only，仅受拉）或TENSKEY=-1（Compress only，仅受压），且必须打开大变形选项，采用非线性计算。

3）值得注意的是，大变形分析将考虑杆件横截面变形引起的刚度变化，而小变形计算不考虑杆件横截面的变形，即杆件的刚度不变。

2.2 梁单元 BEAM188

梁在工程中有着极其重要的应用，如房屋建筑、桥梁、汽车和飞机的主体结构等。梁作为一种结构构件，它的截面尺寸要比它的长度小得多。

实际工程中的梁结构通常要承受拉、压、弯、扭的作用。因此，三维梁单元具有实际工程应用价值。

在ANSYS中，BEAM188单元（三维两节点梁单元）适合于分析从细长到中等粗短的梁结构。该单元基于Timoshenko梁结构理论（变形后横截面保持平面且不发生扭曲），并考虑了剪切变形的影响，适用于大多数的工程问题。BEAM188具有两个节点，每个节点具有6个自由度，即3个平动自由度和3个转动自由度。该单元支持线性形函数、二次形函数和三次形函数。BEAM188单元支持线性分析，大转动、大应变等非线性分析，支持弹性材料定义，塑性、蠕变以及其余非线性材料定义。

2.2.1 梁单元的几何构型

图2-5为BEAM188单元的几何构型。定义BEAM188单元只需两个节点：*I*和*J*，*K*为可选方向节点，以方便调整截面形状。由图2-5可知，节点*I*到节点*J*定义了单元的x轴方向，*K*节点定义了单元的y轴方向，z轴方向满足右手定则。

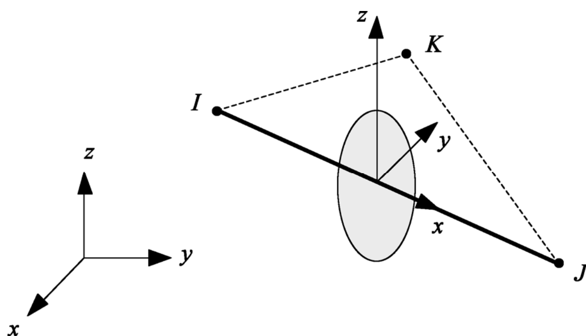


图2-5 BEAM188单元的几何构型

2.2.2 设置单元选项

图2-6为BEAM188 element type options对话框。BEAM188提供了单元选项K1、K2、K3、K4、K6、K7、K9、K11、K12和K15，其中K3是最重要的单元选项，用于设置单元沿长度方向的形函数。ANSYS提供了3种选项：线性形函数（K3=0, Linear Form），这是默认

选项；二次形函数（K3=2, Quadradic Form）；三次形函数（K3=3, Cubic Form）。

对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。建议划分足够细密的网格，以确保计算精度。

对于 Mechanical APDL，建议设置单元选项 K3=3（Cubic Form）。这是因为梁的横向弯曲变形模式为三次多项式，设置单元形函数为三次式，有助于获得更准确的解答。

2.2.3 梁单元的横截面

横截面定义了垂直于梁轴向的截面形状。ANSYS 提供了 11 种常用的梁横截面库，并且支持用户自定义截面形状。图 2-7 为 Beam Tool 对话框，用于定义梁的横截面数据。HyperMesh 可为 ANSYS 创建所有类型的梁横截面，详见第 6.7 节。

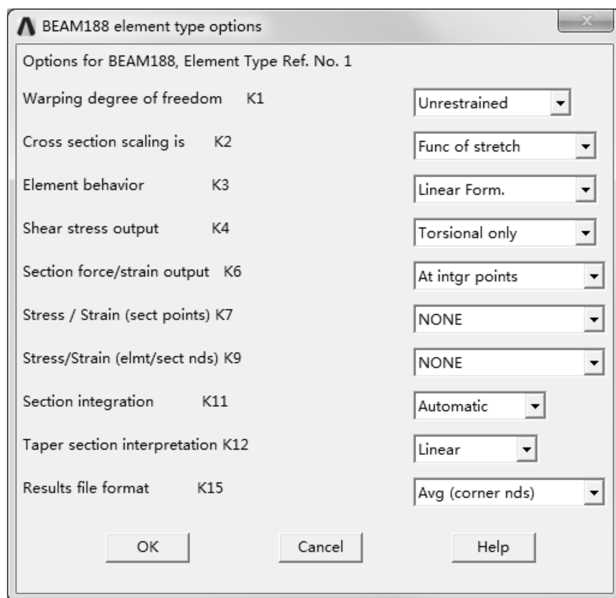


图 2-6 BEAM188 element type options 对话框

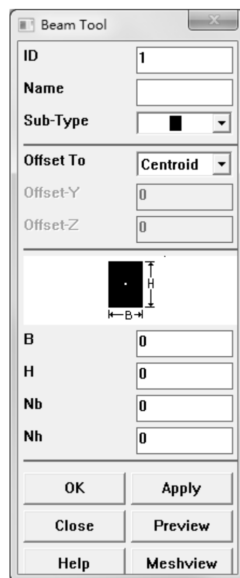


图 2-7 Beam Tool 对话框

2.2.4 梁单元分析实例

悬臂梁（材料为铝，密度为 2700kg/m^3；杨氏模量为 70GPa；泊松比为 0.33）左端固支，右端受力 P=1N，如图 2-8 所示。求梁右端的挠度、最大弯曲应力、前 3 阶横向振动模态频率（x–z 平面内），并与有限元解对比。

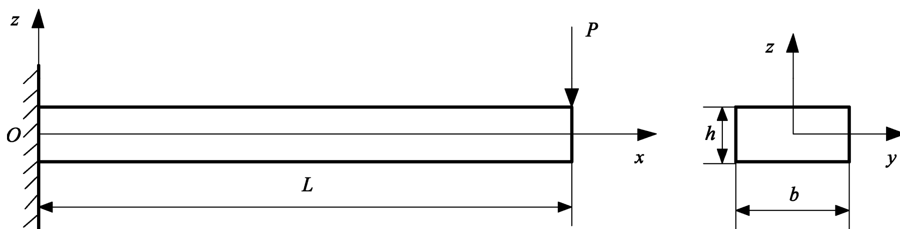


图 2-8 右端受载的悬臂梁

图 2-8 中，L 为梁的长度；h 和 b 为梁的横截面尺寸。

梁右端的挠度 v_{max} 可由式（2-9）[8]

$$v_{max} = \frac{-PL^3}{3EI_y} \tag{2-9}$$

给出。式中，E 为杨氏模量；I_y 为 y 轴惯性矩，且可表达为

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \tag{2-10}$$

由于梁在 O 点的弯矩最大，最大弯曲应力 σ 必然出现在 O 点的上下边缘，即

$$\sigma = \frac{Mh}{2I_y} = \frac{PLh}{2I_y} \tag{2-11}$$

式中，M 为弯矩。

由弹性振动理论，悬臂梁横向振动（图 2-8 中的 x–z 平面）前 3 阶固有频率的理论解为[9]

$$f_n = \frac{a_n^2}{2\pi L^2}\sqrt{\frac{EI_y}{\rho A}} \tag{2-12}$$

式中，f_n 为第 n 阶固有频率；ρ 为材料密度；$A=bh$ 为梁的横截面面积；a_n 为系数，且有 $a_1=1.8751$，$a_2=4.6941$，$a_3=7.8548$。

令 L=100mm，h=2mm，b=4mm，P=1N，并将参数代入式（2-9）～式（2-12）中，即可求出 v_{max}、σ 以及前 3 阶模态频率，列于表 2-3 中。为方便与有限元解进行比较，表 2-3 也列出了有限元解。

表 2-3　有限元解与理论解的对比

项目	理论解	有限元解							
		1 个单元	误差（%）	5 个单元	误差（%）	10 个单元	误差（%）	20 个单元	误差（%）
挠度/mm	1.786	1.786	0	1.786	0	1.786	0	1.786	0
应力/MPa	37.5	37.5	0	37.5	0	37.5	0	37.5	0
1 阶频率/Hz	164.50	164.46	−0.03	164.45	−0.03	164.45	−0.03	164.45	−0.03
2 阶频率/Hz	1030.9	无	无	1028.6	−0.22	1028.6	−0.22	1028.6	−0.22
3 阶频率/Hz	2886.7	无	无	2871.8	−0.52	2871.3	−0.53	2871.3	−0.53

计算及结果说明：

1）对于 BEAM188 单元，设置单元选项 K3=3（Cubic Form），有助于提高计算精度。

2）为便于观察模态变形，将计算单元结果（Calculate elem results）选项开启，设置方法如图 2-9 所示。

3）约束固支端节点的 6 个自由度。除 x–z 平面内的振动外，悬臂梁还产生 x–y 平面内的振动、绕 x 轴的扭振以及沿 x 轴向的振动，本例不做深入研究。

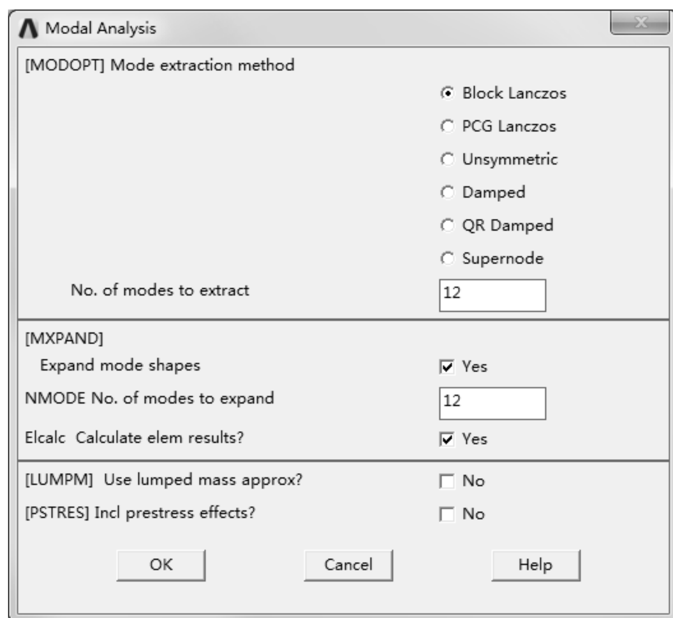


图 2-9　Modal Analysis 对话框

4）BEAM188 单元可以显示横截面形状（/ESHAPE,1）。因此，可直接在应力云图中观察梁的应力分布状态，而无需进行定义单元表等复杂操作。对于本例，*x* 方向的应力即为梁横截面的弯曲应力，如图 2-10 所示。应力在横截面内沿高度方向呈线性变化，与理论吻合。

说明：ANSYS 计算的应力、应变均以单元坐标系表示，位移、支反力等以节点坐标系（默认平行于总体笛卡儿坐标系）表示。

5）*y*、*z* 方向应力，*xy*、*yz*、*xz* 剪应力均为零，第一主应力（σ_1）云图如图 2-11 所示，第二主应力（σ_2）为零，第三主应力（σ_3）云图如图 2-12 所示。von Mises 应力（σ_e）与主应力之间的关系由式（2-13）表达。因此，von Mises 应力云图如图 2-13 所示。对于本例的梁单元，*x* 方向应力、第一主应力和第三主应力绝对值的最大值均完全相同，这是因为梁单元横截面只有一个节点，可精确模拟梁弯曲问题。

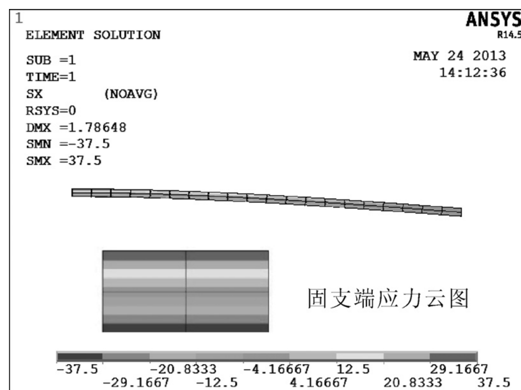


图 2-10　*x* 方向的应力云图

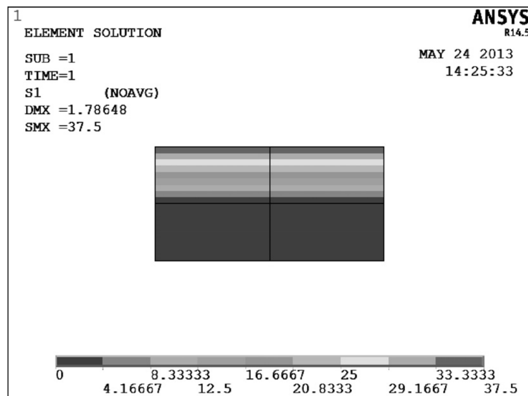


图 2-11　固支端的第一主应力云图

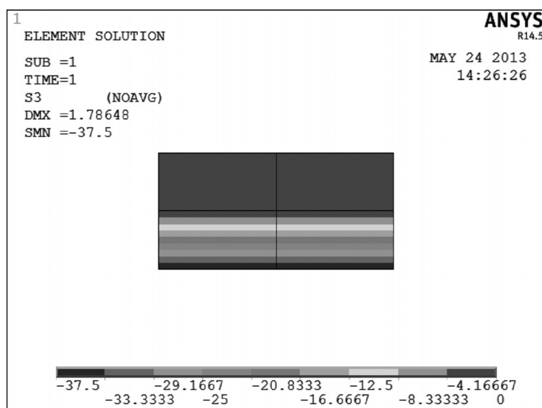


图 2-12 固支端的第三主应力云图

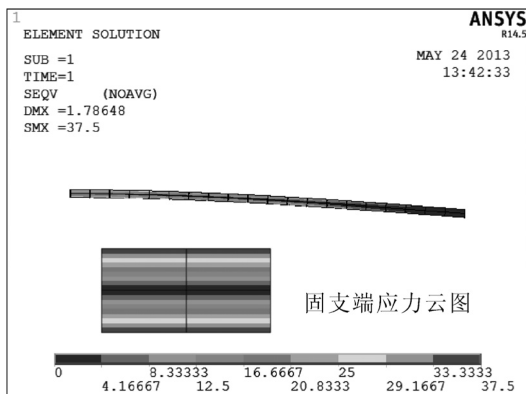
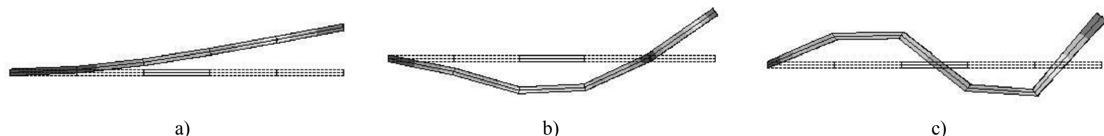


图 2-13 von Mises 应力云图

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2]} \tag{2-13}$$

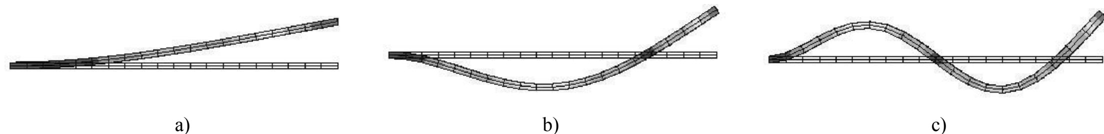
6）对于仅含有 1 个梁单元的模型，也可得出准确的结果，但只能计算 *x*-*z* 平面内的 1 阶模态，这是由系统自由度决定的。图 2-14 和图 2-15 分别为 5 个梁单元、20 个梁单元的前 3 阶模态振型，与理论预测完全一致。



a) b) c)

图 2-14 5 个梁单元的前 3 阶模态振型

a) 1 阶模态 b) 2 阶模态 c) 3 阶模态



a) b) c)

图 2-15 20 个梁单元的前 3 阶模态振型

a) 1 阶模态 b) 2 阶模态 c) 3 阶模态

2.2.5 梁单元的使用建议

1）采用 BEAM188 单元对梁结构进行建模和分析，可以在大幅减少计算量的同时获取精度较高的结果。尽管单个梁单元也可获取准确的计算结果，但至少需要划分足够细密的网格，使系统包含足够多的自由度，以准确模拟结构静态特性和动态特性。

2）对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项（包括 K3=2（Quadradic Form）），用户无需手动修改。建议划分足够细密的网格，以确保计算精度；对于 Mechanical APDL，建议设置单元选项 K3=3（Cubic Form），即设置单元形函数为三次式，以获取较高的计算精度。

3）模态计算中，应开启计算单元结果（Calculate elem results）选项，以方便观察模态变形。

4）由于 BEAM188 单元基于 Timoshenko 梁结构理论，虽然考虑了剪切变形的影响，但

变形后横截面保持平面且不发生扭曲，若需要精确考察结构变形及应力分布（尤其是扭转变形），推荐选用实体单元进行模拟。

2.3 板壳单元 SHELL181 和 SHELL281

板壳结构在工程中有着广泛的应用，如汽车车身、飞机机体、压力容器壁和计算机机箱等都大量应用板壳结构。板壳结构的特点是，它在几何上有一个方向（厚度）的尺度远小于其他两个方向（长、宽）的尺度。

在 ANSYS 中，SHELL181 和 SHELL281 单元适合于分析从薄到中等厚度的板壳结构，适用于大多数的工程问题。SHELL181 单元使用一次位移插值函数，为低阶单元。SHELL281 单元使用二次位移插值函数，为高阶单元，具有线应变性能，适合模拟复杂曲面。三维板壳单元的每个节点具有 6 个自由度，即 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。SHELL181 和 SHELL281 单元支持线性分析，大转动、大应变等非线性分析，支持弹性材料定义，塑性、蠕变以及其余非线性材料定义。

2.3.1 板壳单元的几何构型

图 2-16 和图 2-17 分别为 SHELL181 和 SHELL281 单元的几何构型。默认情况下，单元坐标系位于板壳的中面，节点 *I* 到 *J* 定义了单元的 *x* 轴方向，*y* 轴垂直于 *x* 轴，并指向从节点 *K* 到 *L* 的方向，*z* 轴方向满足右手定则。一般情况下，并不需要关注单元坐标系。

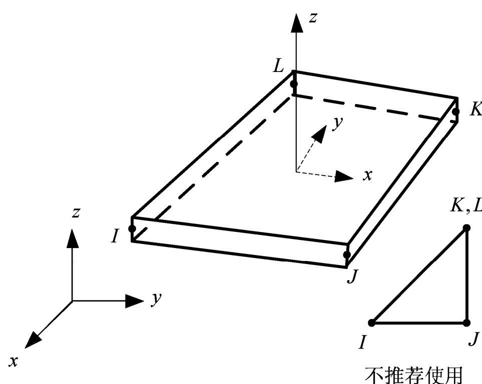


图 2-16　SHELL181 单元的几何构型

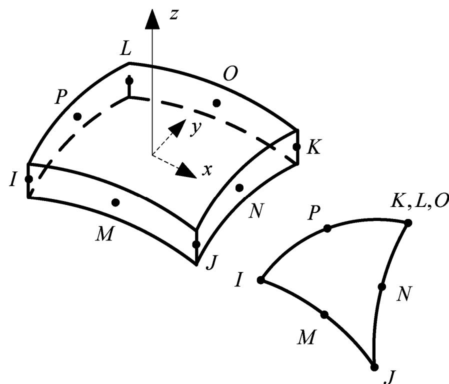


图 2-17　SHELL281 单元的几何构型

SHELL181 单元为 4 节点四边形单元，可退化为三角形单元（*K*、*L* 节点合并），但不推荐使用。

SHELL281 单元为 8 节点高阶四边形单元，也可退化为三角形单元（*K*、*L*、*O* 节点合并）。

2.3.2 设置单元选项

1．SHELL181

图 2-18 为 SHELL181 element type options 对话框。SHELL181 提供了单元选项 K1、K3、K8 和 K9，其中 K3 是最重要的单元选项，用于设置单元积分。ANSYS 提供了两种选项：带

沙漏控制的缩减积分（K3=0, Reduced integration），这是默认选项；非协调模式的完全积分（K3=2, Full w/ Incompatible）。

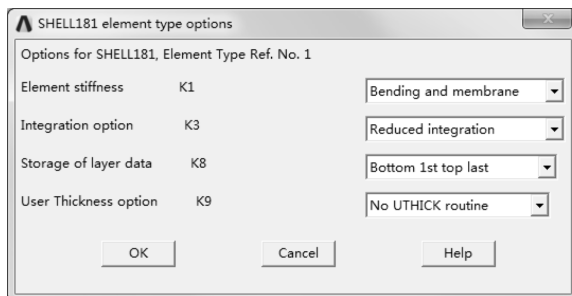


图 2-18 SHELL181 element type options 对话框

当用户使用带沙漏控制的缩减积分选项时，对薄膜和弯曲模式，SHELL181 单元会选用沙漏控制算法。默认情况下，SHELL181 单元会为金属和超弹性应用问题计算沙漏参数。用户可以通过对比总应变能和控制沙漏引入的伪应变能来检测结果的精确性。如果伪应变能和总应变能的比值小于 5%，一般来说，结果就是可以接受的。

在模拟弯曲问题时，建议用户使用非协调模式的完全积分选项。该选项不含任何虚能机制，具有最少的使用限制，即使模型的网格很粗糙，该选项也可以确保足够的精度。

对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。

对于 Mechanical APDL，建议设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible），以提高计算精度。

2．SHELL281

图 2-19 为 SHELL281 element type options 对话框。SHELL281 提供了单元选项 K1、K8 和 K9。

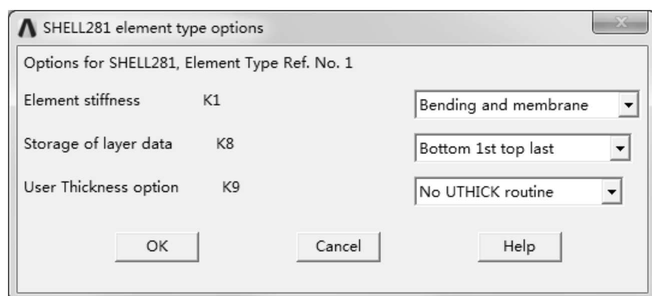


图 2-19 SHELL281 element type options 对话框

对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。

对于 Mechanical APDL，建议采用默认单元选项。

2.3.3 板壳单元的横截面

早期版本的 ANSYS 采用实常数定义板壳的厚度。从第 13 个版本开始，ANSYS 改用横截面定义板壳的厚度及其余数据。

板壳横截面定义了平行于板壳单元 x–y 平面的几何形状。使用板壳横截面命令，用户可以通过定义连续的层来描述单元的 z 轴方向。每一层可有不同的厚度、材料类型、方向和积分点的数量。用户还可以使用板壳横截面工具和命令定义可变厚度的板壳模型来模拟复杂的工程问题。图 2-20 为 Create and Modify Shell Sections 对话框，用于定义板壳的横截面数据。HyperMesh 也可为 ANSYS 定义板壳横截面，详见第 6.2 节。

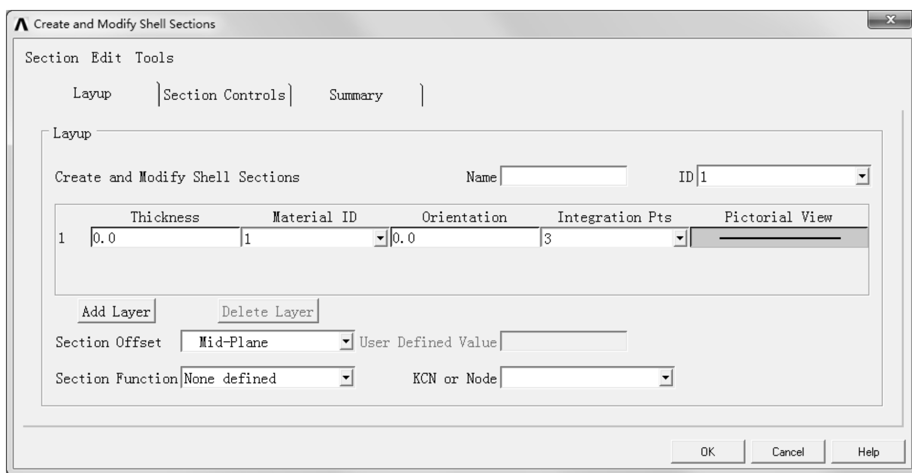


图 2-20 Create and Modify Shell Sections 对话框

2.3.4 板壳单元分析实例 1

本实例采用板壳单元建立悬臂梁的有限元模型，对第 2.2.4 节的实例进行分析。

按照梁的弯曲理论，梁的最大弯曲应力出现在 O 点的上下边缘。第 2.2.4 节采用的梁单元模型严格吻合梁理论。此例采用板壳单元建模，悬臂梁的固支端将产生应力奇异，即随着网格密度的增加，应力不断增大，直至无限大。这是由于采用了理想化的有限元模型，无法表达出实际结构的圆角过渡[5]。因此，本例不考察悬臂梁固支端的应力，而只考察距固支端 $L/2$ 处的横截面的最大弯曲应力（将式（2-11）中的 L 替换为 $L/2$ 即可）。

表 2-4 列出了有限元解与理论解的对比数据。

表 2-4 有限元解与理论解的对比

项 目		挠度/mm	应力/MPa	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz
理论解		1.786	18.75	164.50	1030.9	2886.7
有限元解	20 个四边形单元	1.776	17.93	165.09	1038.7	2933.6
	误差（%）	−0.56	−4.37	0.36	0.76	1.62
	40 个四边形单元	1.780	18.34	164.83	1032.5	2890.6
	误差（%）	−0.34	−2.19	0.20	0.16	0.14
	10 个高阶四边形单元	1.766	18.75	165.11	1032.8	2885.5
	误差（%）	−1.12	0	0.37	0.18	−0.04

（续）

项　　目		挠度/mm	应力/MPa	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz
有限元解	20 个高阶三角形单元	1.772	18.48	165.35	1036.5	2906.5
	误差（%）	−0.78	−1.44	0.52	0.54	0.69
	40 个三角形单元	1.767	17.93	165.60	1040.8	2935.0
	误差（%）	−1.06	−4.37	0.67	0.96	1.67
	30 个混合单元	1.776	18.08	165.10	1038.2	2930.1
	误差（%）	−0.56	−3.57	0.36	0.71	1.50

计算及结果说明：

1）所有网格划分模式在梁的宽度方向（见图 2-8，y 轴方向）均为一个网格。高阶单元为 SHELL281，其余单元为 SHELL181。

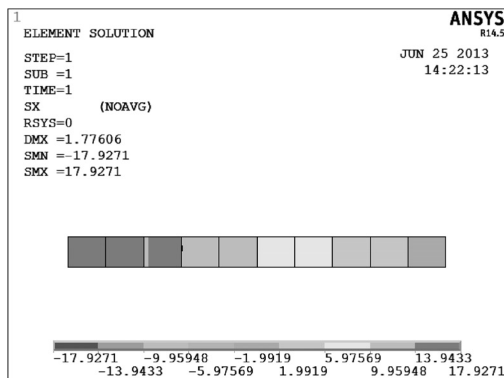
2）对于 SHELL181 单元，设置单元选项 K3=2（Full w/Incompatible），以提高计算精度；对于 SHELL281 单元，采用默认单元选项。

3）为了便于观察分析结果，可将计算单元结果（Calculate elem results）选项开启，设置方法如图 2-9 所示。

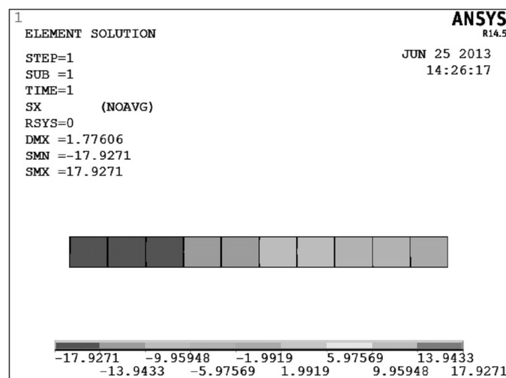
4）约束固支端所有节点的 6 个自由度。除 x–z 平面内的振动外，悬臂梁还产生 x–y 平面内的振动、绕 x 轴的扭振以及沿 x 轴向的振动，本例不做深入研究。

5）除非特别声明，本节只给出悬臂梁右半段的应力云图。

6）与第 2.2.4 节相同，对于应力结果，依然查看 x 方向的应力。开启板壳单元厚度显示选项（/ESHAPE,1），可查看上、下板面的应力云图（见图 2-21～图 2-23）和位移云图。上、下板面的应力云图是符合工程实际的，而沿板厚方向的结果不能通过云图显示的方式正确表达。例如，与图 2-11 和图 2-12 对比可知，图 2-24 显示的主应力云图不符合实际情况（计算正确，仅存在显示问题，ANSYS 将其显示为线性变化）。对于本例，上、下板面的 von Mises 应力是相同的，因此，ANSYS 将显示出如图 2-25 所示的 von Mises 应力云图（ANSYS 无法正确表达应力沿板厚方向的变化）。



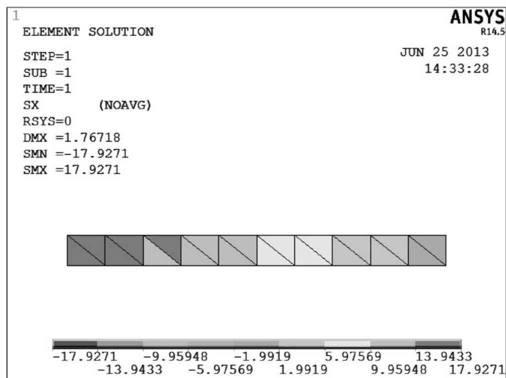
a)



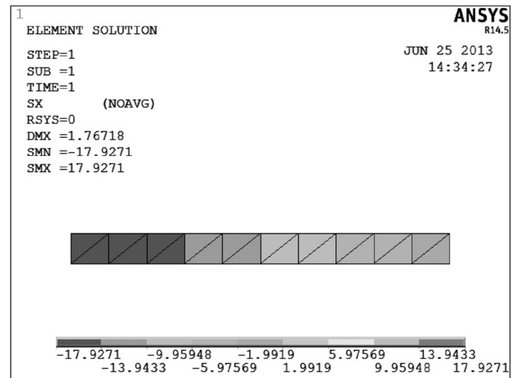
b)

图 2-21　上、下板面 x 方向的应力云图（四边形单元）

a) 上板面　b) 下板面



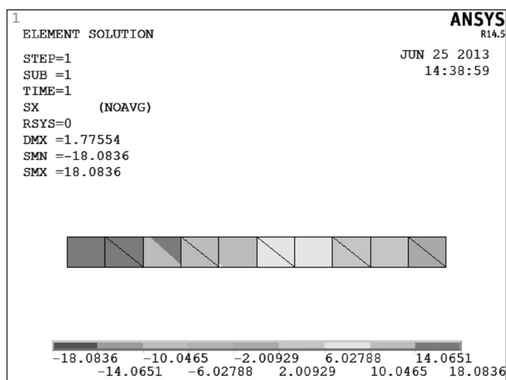
a)



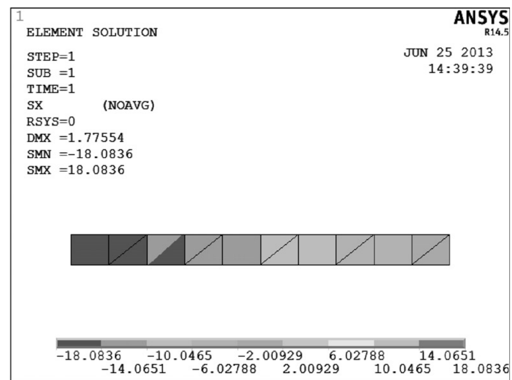
b)

图 2-22　上、下板面 x 方向的应力云图（三角形单元）

a) 上板面　b) 下板面



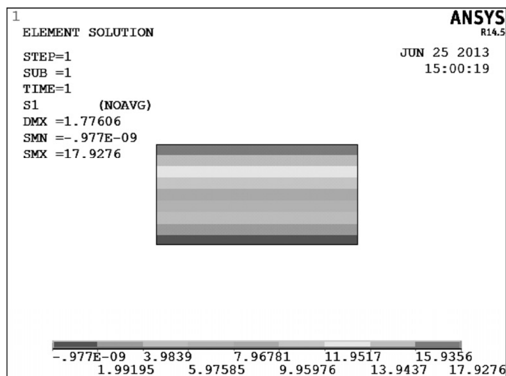
a)



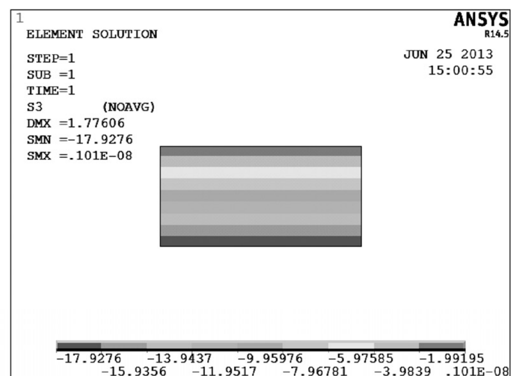
b)

图 2-23　上、下板面 x 方向的应力云图（混合单元）

a) 上板面　b) 下板面



a)



b)

图 2-24　距固支端 $L/2$ 处的横截面的主应力云图（20 个四边形单元）

a) 第一主应力云图　b) 第三主应力云图

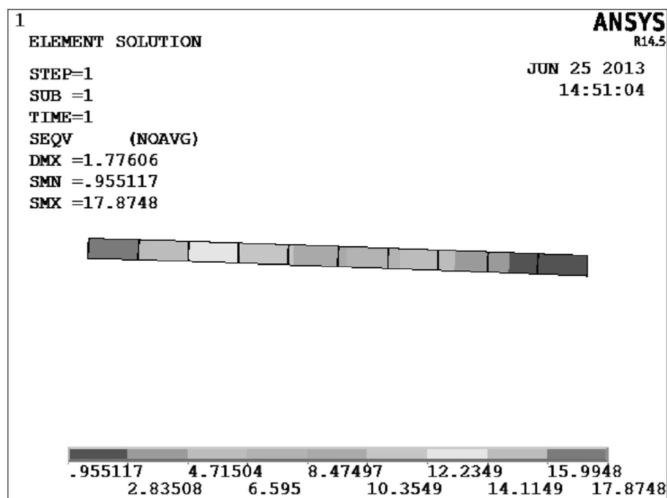


图 2-25 von Mises 应力云图（四边形单元）

7）表 2-4 的计算结果显示：即使是低阶三角形单元和混合单元的数值结果，也能很好地与理论解吻合。这是因为板壳仅产生了垂直于板面的变形，低阶三角形单元刚度较大的特性没有表现出来。若分析平行于板面的变形，结论将有所不同，第 2.3.5 节给出了具体实例。

8）由于固支端存在应力奇异，因此，*y*、*z* 方向应力，*xy*、*yz*、*xz* 剪应力和第二主应力一般不为零。尽管如此，板壳单元比梁单元更能符合工程实际，因为梁单元是一种理想的模型。

9）板壳单元能够准确计算梁结构的模态频率和振型，模态振型与图 2-15 完全一致。

2.3.5 板壳单元分析实例 2

将第 2.3.4 节中的集中力 *P* 改为垂直于纸面向内，即 *y* 方向，其余条件不变，求解梁右端的挠度、距固支端 *L*/2 处的横截面的最大弯曲应力、*x*-*y* 平面内的前 3 阶横向振动模态频率，并与板壳单元有限元解对比。

梁的挠度、*x*-*y* 平面内的前 3 阶横向振动模态频率可分别采用式（2-9）和式（2-12）进行计算，但需要将式中所有的 *y* 轴惯性矩（I_y）替换为 *z* 轴惯性矩（I_z），I_z 可表示为：

$$I_z = \frac{b^3 h}{12} \tag{2-14}$$

弯曲应力 σ 由式（2-15）计算：

$$\sigma = \frac{PLb}{4I_z} \tag{2-15}$$

表 2-5 列出了有限元解与理论解的对比数据。

表 2-5 有限元解与理论解的对比

项 目		挠度/mm	应力/MPa	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz
理论解		0.446	9.375	329.0	2061.9	5773.3
有限元解	20 个四边形单元	0.446	8.897	328.9	2059.3	5769.1
	误差（%）	0	−5.10	−0.03	−0.13	−0.07
	10 个高阶四边形单元	0.433	9.170	334.2	2078.7	5756.6
	误差（%）	−2.91	−2.19	1.58	0.81	−0.29
	20 个高阶三角形单元	0.429	8.482	336.0	2103.8	5891.6
	误差（%）	−3.81	−9.53	2.13	2.03	2.05
	40 个三角形单元	0.087	1.947	742.0	4544.1	12313.0
	误差（%）	−80.50	−79.23	125.54	120.38	113.27
	30 个混合单元	0.290	8.899	405.4	2535.5	7086.6
	误差（%）	−34.98	−5.08	23.21	22.97	22.75
	5016 个三角形单元	0.437	9.121	332.4	2068.0	5362.5
	误差（%）	−2.02	−2.71	1.03	0.30	−7.12

计算及结果说明：

1）表 2-5 中的计算项目采用第 2.3.4 节中的网格模型，包括单元类型和单元选项。最后一项的网格模型如图 2-26 所示。

2）与第 2.3.4 节相同，约束固支端所有节点的 6 个自由度。对于应力结果，依然查看 x 方向应力。

3）低阶三角形单元属于常应变、常应力单元（单元内应变、应力为常数）。在结构分析中，低阶三角形单元表现出较高的刚度特性，为提高计算精度，必须划分足够细密的网格。图 2-27 为低阶四边形和三角形混合单元的应力云图，可见低阶三角形单元内的应力是均匀不变的。图 2-28 为高阶三角形单元的应力云图，可见单元内的应力呈线性变化。

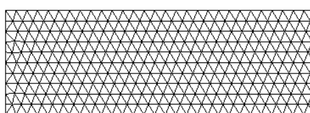


图 2-26 5016 个三角形单元（局部）



图 2-27 低阶四边形和三角形混合单元的应力云图

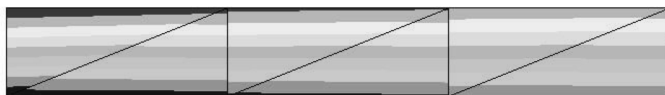


图 2-28 高阶三角形单元的应力云图

2.3.6 板壳单元的使用建议

1）板壳单元能够准确模拟梁结构的静态特性和动态特性。为准确模拟结构的高频振动，必须划分足够细密的有限元网格。

2）对于 SHELL181 单元，Workbench Mechanical 将自动设置优化的单元选项（包含 K3=2（Full w/ Incompatible）），用户无需手动修改。对于 Mechanical APDL，建议设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible），以提高计算精度。

3）对于 SHELL281 单元，Workbench Mechanical 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。对于 Mechanical APDL，建议采用默认单元选项。

4）为了便于观察分析结果，可将计算单元结果（Calculate elem results）选项开启。

5）对于结构分析，应尽量避免使用低阶三角形单元，尤其是在结果梯度很大或其他需要关注的区域。这是因为低阶三角形单元属于常应变、常应力单元（单元内应变、应力为常数），表现出较高的刚度特性。为提高计算精度，必须划分足够细密的网格，这将显著增加计算量，进而给求解带来困难。

6）高阶板壳单元更适合模拟曲面或曲线边界，且能以较少单元取得较高的计算精度。对于板壳单元，低阶单元与高阶单元区别并不十分明显（低阶三角形单元除外），因此，除非需要获取高精度的应力，可优先采用低阶四边形单元建立板壳模型。

7）对于线性单元 SHELL181，应避免使用过于扭曲的网格，它将显著降低计算精度。过度扭曲的网格也会降低高阶单元 SHELL281 的计算精度，但不如低阶单元明显。在建模过程中，对网格进行检查，并提高网格质量是一个良好的习惯。

8）对于板壳单元的后处理，只有板面的显示结果符合工程实际，板内显示为板面之间的线性变化，不一定符合工程实际。尽管如此，实际工程中往往只需考察板的表面，而不用考察板的内部。

9）SHELL181 和 SHELL281 单元适合于分析从薄到中等厚度的板壳结构，若需要精确考察板壳内部变形及应力分布，推荐选用实体单元进行模拟。

10）在有限元模型中，任何尖角的引入都将导致该处应力奇异。一般来说，这对模型的总体响应没有太大影响，但在靠近奇异处所预测的应力是不准确的。如果要获取尖角处精确的应力，则应采用实体单元建立包含细节特征的有限元模型。

2.4 实体单元 SOLID185、SOLID186 和 SOLID187

工程中的绝大部分结构都属于空间结构，如汽车、飞机的发动机，工程机械、建筑物、桥梁的主体结构，人体骨骼等。这类结构的几何模型为三维实体，需要采用空间实体单元进行模拟。

在 ANSYS 中，SOLID185、SOLID186 和 SOLID187 单元适用于大多数的工程问题。SOLID185 单元使用一次位移插值函数，为低阶单元。SOLID186 和 SOLID187 单元使用二次位移插值函数，为高阶单元，具有线性应变性能，适合模拟具有曲面边界的实体。三维实体单元的每个节点具有 3 个自由度，即 3 个平动自由度。SOLID185、SOLID186 和 SOLID187 单元支持线性分析，大变形、大应变等非线性分析，支持弹性材料定义，塑性、蠕变以及其

余非线性材料定义。

2.4.1 实体单元的几何构型

图 2-29、图 2-30 和图 2-31 分别为 SOLID185、SOLID186 和 SOLID187 单元的几何构型。默认情况下，单元坐标系平行于总体笛卡儿坐标系。一般情况下，并不需要关注单元坐标系。

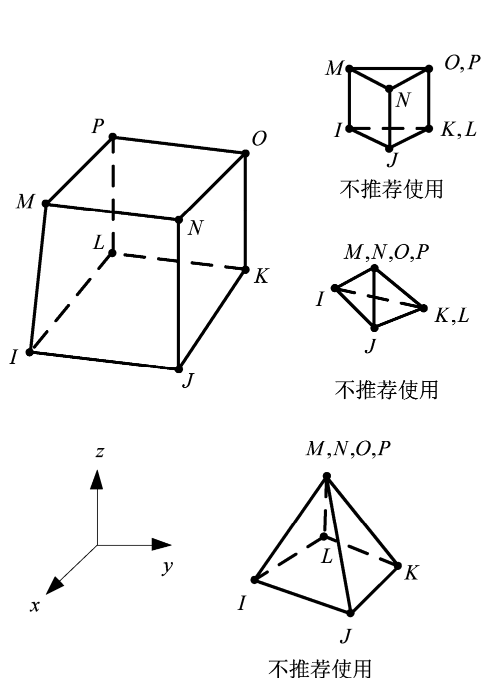


图 2-29　SOLID185 单元的几何构型

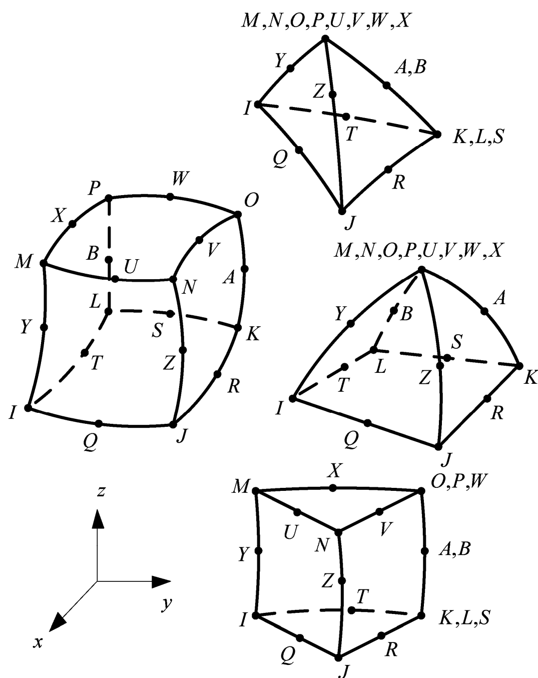


图 2-30　SOLID186 单元的几何构型

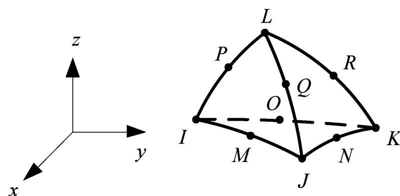


图 2-31　SOLID187 单元的几何构型

SOLID185 单元为 8 节点六面体单元，可退化为楔形单元（*K*、*L* 节点合并，*O*、*P* 节点合并）、四面体单元（*K*、*L* 节点合并，*M*、*N*、*O*、*P* 节点合并）和金字塔单元（*M*、*N*、*O*、*P* 节点合并），但不推荐使用。

SOLID186 单元为 20 节点高阶六面体单元，可退化为金字塔单元（*M*、*N*、*O*、*P*、*U*、*V*、*W*、*X* 节点合并）、楔形单元（*K*、*L*、*S* 节点合并，*A*、*B* 节点合并，*O*、*P*、*W* 节点合并）和四面体单元（*K*、*L*、*S* 节点合并，*A*、*B* 节点合并，*M*、*N*、*O*、*P*、*U*、*V*、*W*、*X* 节点合并）。

SOLID187 单元为 10 节点高阶四面体单元，专门用于模拟不规则的实体结构。

2.4.2 设置单元选项

1．SOLID185

图 2-32 为 SOLID185 element type options 对话框。SOLID185 提供了单元选项 K2、K3 和 K6，其中 K2 是最重要的单元选项，用于设置单元技术。ANSYS 提供了 4 种选项：基于 $\overline{B}$ 方法的完全积分（K2=0, Full Integration），这是默认选项；带沙漏控制的一致缩减积分（K2=1, Reduced integration）；增强应变公式（K2=2, Enhanced strain）；简化的增强应变公式（K2=3, SimpleEnhanced strn）。

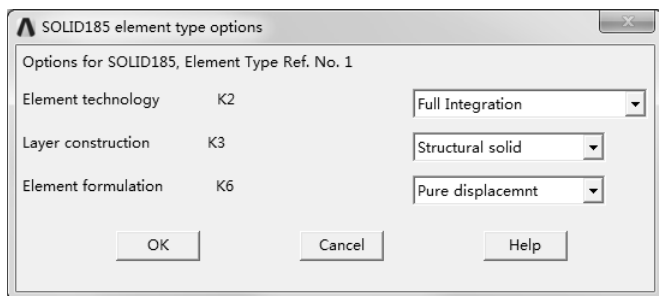


图 2-32　SOLID185 element type options 对话框

1）基于 $\overline{B}$ 方法的完全积分。这种方法有助于在几乎不可压缩（泊松比接近 0.5）的情况下预防体积锁定，它在单元的高斯积分点上用体积应变代替平均体积应变。然而，这种方法不能预防在弯曲问题中产生的任何剪切锁定，在这种情况下，应该采用增强应变公式。如果不确定弯曲行为是否发生，推荐用户使用增强应变公式。

2）带沙漏控制的一致缩减积分。这种方法有助于在弯曲问题中预防剪切锁定，在几乎不可压缩的情况下也可预防体积锁定。由于只有一个积分点，这种方法的计算效率比 $\overline{B}$ 方法更高。然而，为了控制沙漏而引入的伪应变能可能会对计算精度产生影响，应将这种算法作为最后的选择。

当使用这种方法时，通过比较总应变能和控制沙漏引入的伪应变能来检测结果的精确性。如果伪应变能和总应变能的比值小于 5%，结果一般可以接受；如果比值大于 5%，则应重新细化网格。

3）增强应变公式。为了预防弯曲变形时的剪切锁定和几乎不可压缩时的体积锁定，这种方法引入了数个内部自由度。所有的内部自由度在单元层次引入，在求解过程中被凝聚。因为额外的内部自由度和静态凝聚，这种方法不如 $\overline{B}$ 方法和带沙漏控制的一致缩减积分高效。

4）简化的增强应变公式。这是一个特殊的增强应变公式，只引入了预防剪切锁定需要的内部自由度。由于没有内部自由度处理体积锁定，当材料是几乎不可压缩时，这种方法并不理想，除非同时使用了混合 U/P 模式（K6=1（Mixed U/P））。当与混合 U/P 模式一起使用时，简化增强应变公式和增强应变公式得到了同样的结果。所有的内部自由度在单元层次引入，在求解过程中被凝聚。

对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。

对于 Mechanical APDL，建议设置单元选项 K2=2（Enhanced strain），即采用增强应变公

式的方法。这种方法可消除剪切锁定和体积锁定，虽然计算量较大，但可提高计算精度。

2．SOLID186

图 2-33 为 SOLID186 element type options 对话框。SOLID186 提供了单元选项 K2、K3 和 K6，其中 K2 是最重要的单元选项，用于设置单元技术。ANSYS 提供了两种选项：一致缩减积分（K2=0, Reduced integr），这是默认选项；完全积分（K2=1, Full integration）。

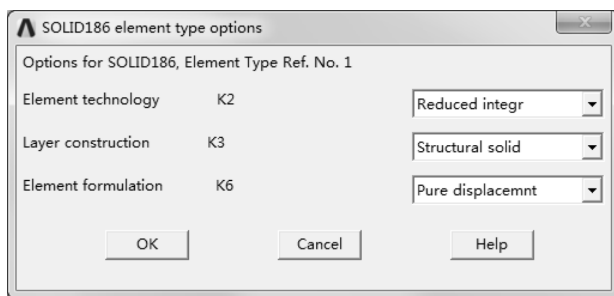


图 2-33　SOLID186 element type options 对话框

1）一致缩减积分。在预防几乎不可压缩时的体积锁定是有效的，然而，如果在每个方向上不能保证至少两层单元，则沙漏模式可能在模型中传播。

2）完全积分。完全积分不会引起沙漏模式，但在材料几乎不可压缩时可能导致体积锁定，这种方法常用于纯线性分析，或者当模型在每个方向只有一层单元时。

值得注意的是，对于高阶单元，由于其边界可以弯曲，一般不存在剪切锁定的问题。

对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。

对于 Mechanical APDL，当模拟可压缩材料时，建议设置单元选项 K2=1（Full integration），以消除沙漏模式；当模拟几乎不可压缩材料时，建议设置单元选项 K2=0（Reduced integr），并在每个方向上至少划分两层单元，以消除沙漏模式。

3．SOLID187

图 2-34 为 SOLID187 element type options 对话框。SOLID187 只提供了单元选项 K6，对模拟完全不可压缩材料和接近不可压缩材料提供了支持。

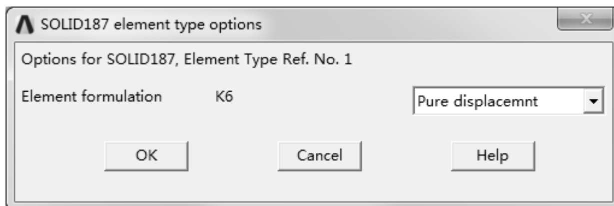


图 2-34　SOLID187 element type options 对话框

对于 Workbench Mechanical，ANSYS 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。

对于 Mechanical APDL，建议采用默认单元选项。

2.4.3 实体单元分析实例

采用实体单元建立悬臂梁的有限元模型，对第 2.2.4 节的实例进行分析。

尽管实体单元可以通过构建悬臂梁固支端的圆角过渡，从而避免应力奇异，但本例不做深入研究。因此，与第 2.3.4 节相同，本例不考察悬臂梁固支端的应力，只考察距固支端 *L*/2 处的横截面的最大弯曲应力。

表 2-6 列出了有限元解与理论解的对比数据。

表 2-6　有限元解与理论解的对比

项　　目		挠度/mm	应力/MPa	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz
理论解		1.786	18.75	164.50	1030.9	2886.7
有限元解	20 个六面体单元	1.773	17.89	165.26	1040.0	2939.2
	误差（%）	−0.73	−4.59	0.46	0.88	1.82
	360 个六面体单元	1.772	18.29	165.34	1035.9	2901.2
	误差（%）	−0.78	−2.45	0.51	0.49	0.50
	2160 个六面体单元	1.775	18.44	165.14	1033.7	2889.8
	误差（%）	−0.62	−1.65	0.39	0.27	0.11
	20 个高阶六面体单元	1.762	18.42	165.96	1039.2	2906.4
	误差（%）	−1.34	−1.76	0.89	0.81	0.68
	360 个高阶六面体单元	1.776	18.68	165.07	1032.6	2883.1
	误差（%）	−0.56	−0.37	0.35	0.16	−0.12
	2160 个高阶六面体单元	1.779	18.71	164.94	1031.7	2880.3
	误差（%）	−0.39	−0.21	0.27	0.08	−0.22
	4089 个高阶四面体单元	1.779	18.74	164.89	1031.4	2879.7
	误差（%）	−0.39	−0.05	0.24	0.05	−0.24
	4089 个四面体单元	1.067	14.31	212.99	1332.8	3714.9
	误差（%）	−40.26	−23.68	29.48	29.29	28.69
	69717 个四面体单元	1.600	19.03	173.89	1087.8	3037.3
	误差（%）	−10.41	1.49	5.71	5.52	5.22
	1616 个楔形单元	1.574	18.84	175.35	1096.6	3064.3
	误差（%）	−11.87	0.48	6.60	6.37	6.15

计算及结果说明：

1）网格划分模式由表 2-7 列出，几何模型及坐标系详见图 2-8。高阶单元为 SOLID186 或 SOLID187，其余单元为 SOLID185。

2）对于 SOLID185 单元，设置单元选项 K2=2（Enhanced strain），采用增强应变公式算法；对于 SOLID186 单元，设置单元选项 K2=1（Full integration），采用完全积分算法；对于 SOLID 187 单元，采用默认单元选项。

3）计算表明，对于 SOLID185 单元，简化的增强应变公式算法（K2=3, SimpleEnhanced strn）与增强应变公式算法（K2=2, Enhanced strain）具有同等的计算精度；对于 SOLID186 单元，一

致缩减积分算法（K2=0, Reduced integr）与完全积分算法（K2=1, Full integration）具有同等的计算精度；对于高阶四面体网格，SOLID187 单元与 SOLID186 单元也具有同等的计算精度。

表 2-7　网格划分模式

网格模式	网格数量		
	x 方向	*y* 方向	*z* 方向
20 个（高阶）六面体	20	1	1
360 个（高阶）六面体	40	3	3
2160 个（高阶）六面体	60	6	6
4089 个（高阶）四面体	较密，如图 2-35 所示		
69 717 个四面体	细密，如图 2-36 所示		
1616 个楔形	较密，如图 2-37 所示		

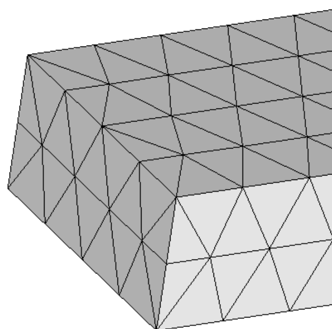


图 2-35　4089 个四面体网格（局部）

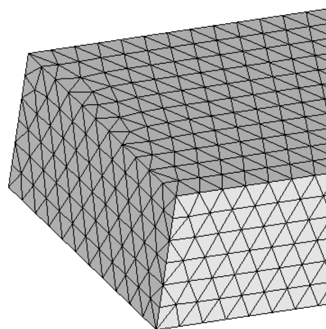


图 2-36　69 717 个四面体网格（局部）

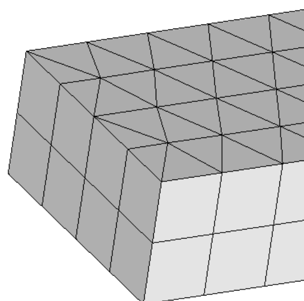


图 2-37　1616 个楔形网格（局部）

4）约束固支端所有节点的 3 个平动自由度。除 *x*-*z* 平面内的振动外，悬臂梁还产生 *x*-*y* 平面内的振动、绕 *x* 轴的扭振以及沿 *x* 轴向的振动，本例不做深入研究。

5）除非特别声明，本节只给出悬臂梁右半段的应力云图。

6）与第 2.2.4 节相同，对于应力结果，依然查看 *x* 方向应力。图 2-38 和图 2-39 为悬臂

梁 x 方向的应力云图。图 2-40 和图 2-41 为距固支端 $L/2$ 处的横截面的主应力云图。图 2-42 和图 2-43 为悬臂梁的 von Mises 应力云图。

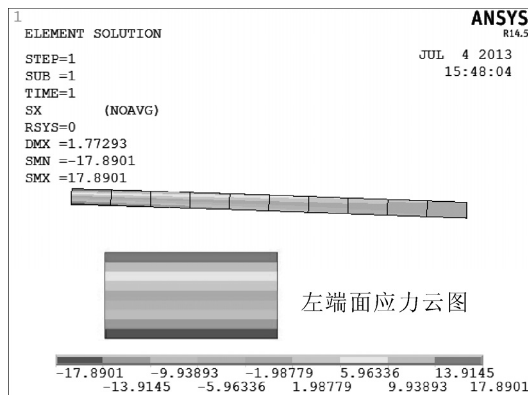


图 2-38 x 方向的应力云图（一层六面体单元）

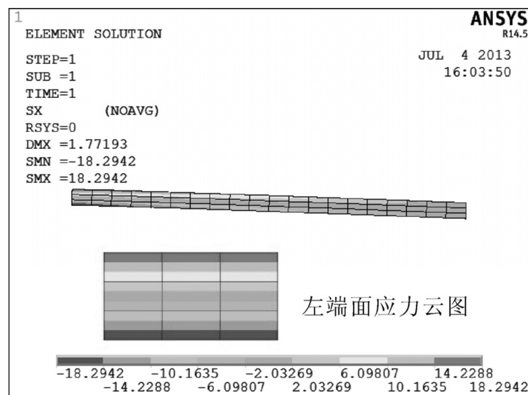
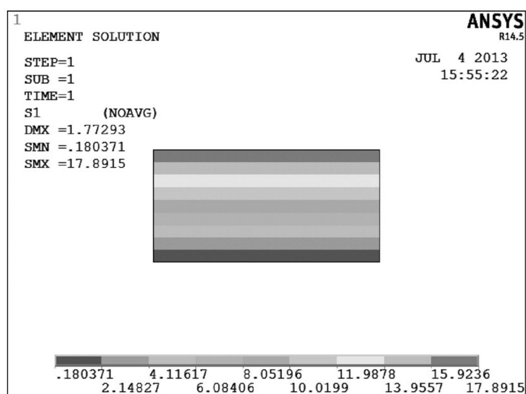
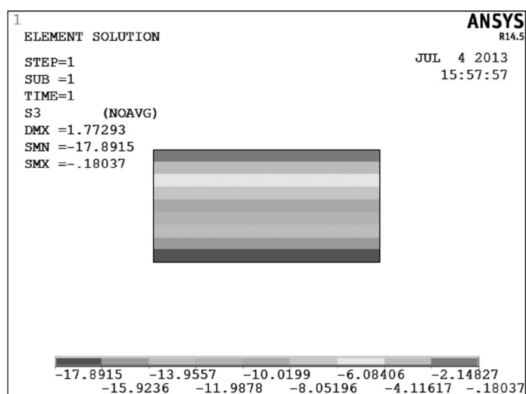


图 2-39 x 方向的应力云图（三层六面体单元）



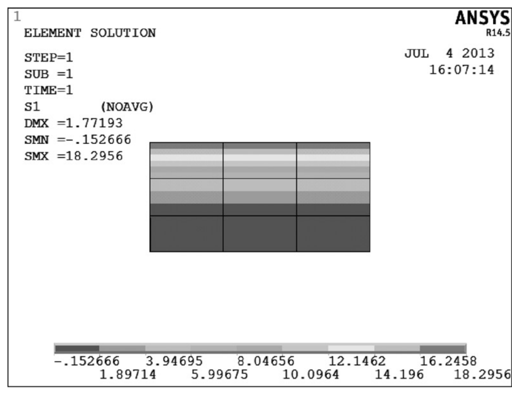
a)



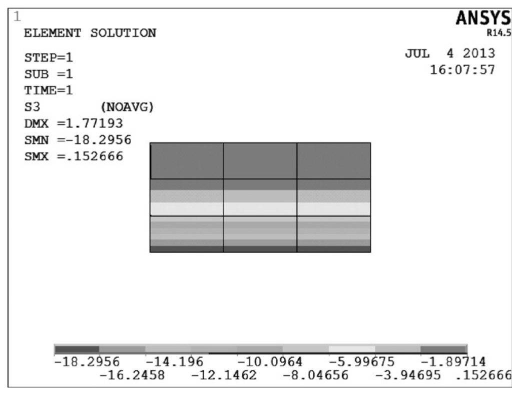
b)

图 2-40 距固支端 $L/2$ 处的横截面的主应力云图（一层六面体单元）

a) 第一主应力云图 b) 第三主应力云图



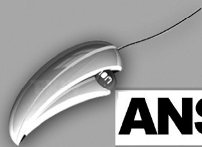
a)



b)

图 2-41 距固支端 $L/2$ 处的横截面的主应力云图（三层六面体单元）

a) 第一主应力云图 b) 第三主应力云图



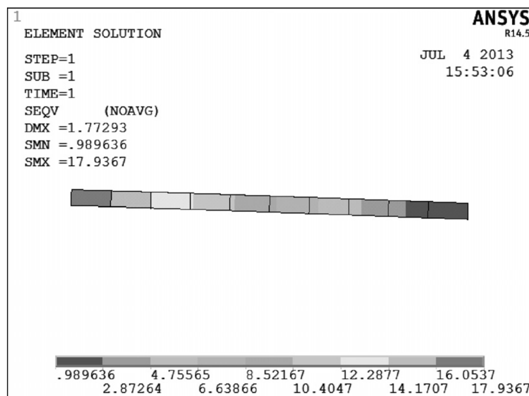


图 2-42 von Mises 应力云图（一层六面体单元）

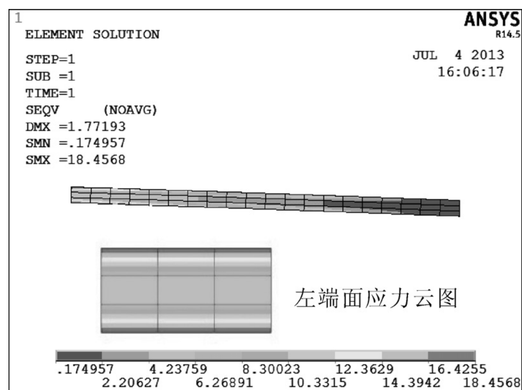


图 2-43 von Mises 应力云图（三层六面体单元）

7）将图 2-38、图 2-40、图 2-42 分别与图 2-21、图 2-24、图 2-25 进行对比可知：单层六面体网格模型类似于板壳模型，能够准确分析结构表面应力，却无法精确表达结构内部的应力分布状态。将图 2-39、图 2-41、图 2-43 与图 2-10~图 2-13 进行对比可知：三层六面体网格模型能够准确表达结构内部及表面的应力分布状态。

8）由于固支端存在应力奇异，因此，*y*、*z* 方向应力，*xy*、*yz*、*xz* 剪应力和第二主应力一般不为零。尽管如此，实体单元比梁单元和板壳单元更符合工程实际，因为梁单元和板壳单元均是简化模型。

9）图 2-44 为不同单元的应力云图。除低阶四面体单元表现出常应力特性（单元内的应力均匀不变）之外，其余单元内的应力均呈线性分布。计算表明，低阶退化单元（楔形单元、四面体单元和金字塔单元）都表现出较高的刚度特性，以低阶四面体单元最为突出，为提高计算精度，必须划分足够细密的网格。

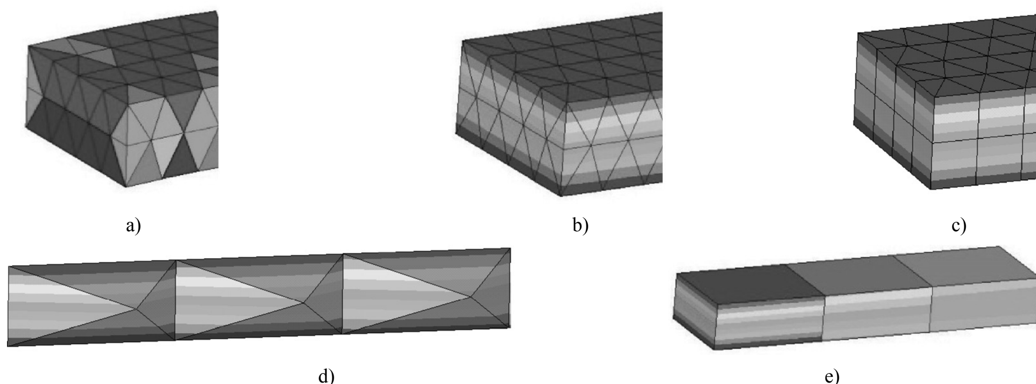


图 2-44 单元应力云图

a) 低阶四面体单元 b) 高阶四面体单元 c) 低阶楔形单元 d) 低阶金字塔单元 e) 低阶六面体单元

10）实体单元能够准确计算梁结构的模态频率和振型，模态振型与图 2-15 完全一致。

2.4.4 实体单元的使用建议

1）实体单元能够准确模拟梁结构的静态特性和动态特性。为准确模拟结构的高频振动，

必须划分足够细密的有限元网格。

2）对于 SOLID185 单元，Workbench Mechanical 将自动设置优化的单元选项（包含 K2=3（SimpleEnhanced strn）)，用户无需手动修改。对于 Mechanical APDL，建议设置单元选项 K2=2（Enhanced strain），即采用增强应变公式方法，这种方法可消除剪切锁定和体积锁定，虽然计算量较大，但可提高计算精度。

3）对于 SOLID186 单元，Workbench Mechanical 将自动设置优化的单元选项（包含 K2=0（Reduced integr）)，用户无需手动修改。由于使用了一致缩减积分算法，应在每个方向上至少划分两层单元，以消除沙漏模式。对于 Mechanical APDL，当模拟可压缩材料时，建议设置单元选项 K2=1（Full integration），以消除沙漏模式；当模拟几乎不可压缩材料时，建议设置单元选项 K2=0（Reduced integr），并在每个方向上至少划分两层单元，以消除沙漏模式。

4）对于 SOLID187 单元，Workbench Mechanical 将自动设置优化的单元选项，用户无需手动修改。对于 Mechanical APDL，建议采用默认单元选项。

5）当模拟可压缩材料时，对于 SOLID185 单元，简化的增强应变公式算法（K2=3, SimpleEnhanced strn）与增强应变公式算法（K2=2, Enhanced strain）具有同等的计算精度；对于 SOLID186 单元，一致缩减积分算法（K2=0, Reduced integr）与完全积分算法（K2=1, Full integration）具有同等的计算精度；对于高阶四面体网格，SOLID187 单元与 SOLID186 单元也具有同等的计算精度。

6）计算表明，低阶退化单元（楔形单元、四面体单元和金字塔单元）都表现出较高的刚度特性，以低阶四面体单元最为突出（表现出常应力特性）。对于结构分析，应尽量避免使用低阶退化单元，尤其是在结果梯度很大或其他须关注的区域。为提高计算精度，必须划分足够细密的网格，这将显著增加计算量，进而给求解带来困难。

7）高阶实体单元更适合模拟具有曲面边界的实体，且能以较少单元取得较高的计算精度。对于六面体单元，低阶单元与高阶单元区别并不十分明显。因此，除非需要获取高精度的应力，否则可优先采用低阶六面体单元建立实体模型。对于复杂的实体模型，可优先采用高阶四面体单元建立实体模型。

8）对于线性单元 SOLID185，应避免使用过于扭曲的网格，它将显著降低计算精度。过度扭曲的网格也会降低高阶单元 SOLID186 和 SOLID187 的计算精度，但不如低阶单元明显。在建模过程中，对网格进行检查，并提高网格质量是一个良好的习惯。

9）除结构表面应力外，若还须考察结构内部的应力分布状态，应在结构的每个方向至少划分三层网格（非低阶退化单元）。

10）在有限元模型中，任何尖角的引入都将导致该处应力奇异。一般来说，这对模型的总体响应没有太大影响，但在靠近奇异处所预测的应力是不准确的。如果要获取尖角处精确的应力，则应构造准确的结构细节特征，并划分足够细密的实体网格。

2.5 质量单元 MASS21

质量单元用于模拟集中质量，并可包含转动惯量。ANSYS 提供了质量单元 MASS21。

2.5.1 质量单元描述

MASS21 是有多至 6 个自由度的点单元：沿节点坐标系 *x*、*y*、*z* 方向的平动和绕 *x*、*y*、*z* 轴的转动，每个坐标轴方向可以指定不同的质量和转动惯量。图 2-45 为 MASS21 质量单元的几何构型。

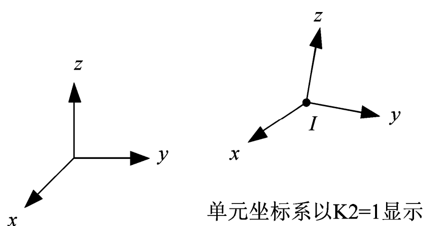


图 2-45　MASS21 单元的几何构型

2.5.2 设置单元选项

图 2-46 为 MASS21 element type options 对话框。MASS21 提供了单元选项 K1、K2 和 K3。

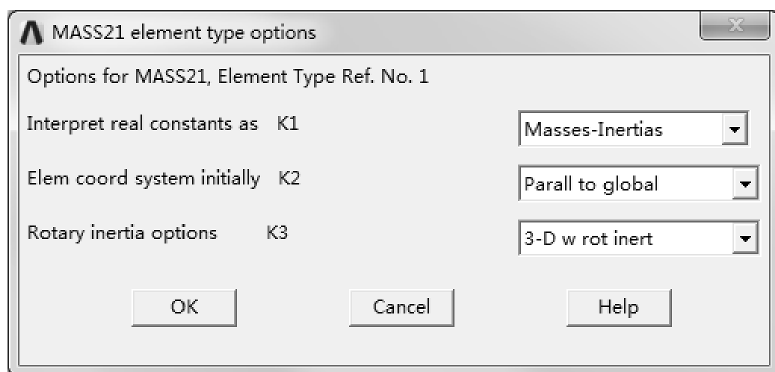


图 2-46　MASS21 element type options 对话框

对于三维质量单元，通常应同时包含质量和转动惯量，保持默认单元选项即可。

说明：K2 用于控制单元坐标系的初始方向，K2=0（Parall to global）为默认设置，表示单元坐标系初始平行于总体笛卡儿坐标系；K2=1（Par to nodal sys）表示单元坐标系初始平行于节点坐标系，如图 2-45 所示。

2.5.3 设置实常数

实常数用于定义单元质量属性，包括对单元坐标系的质量 MASSX、MASSY、MASSZ，对单元坐标轴的转动惯量 IXX、IYY、IZZ，如图 2-47 所示。

一般地，质量单元在 3 个平动方向具有相同的质量，须定义所有轴的质量（即使数值相同），但绕各坐标轴的转动惯量可能不同，须分别定义，即需要定义 6 个实常数。

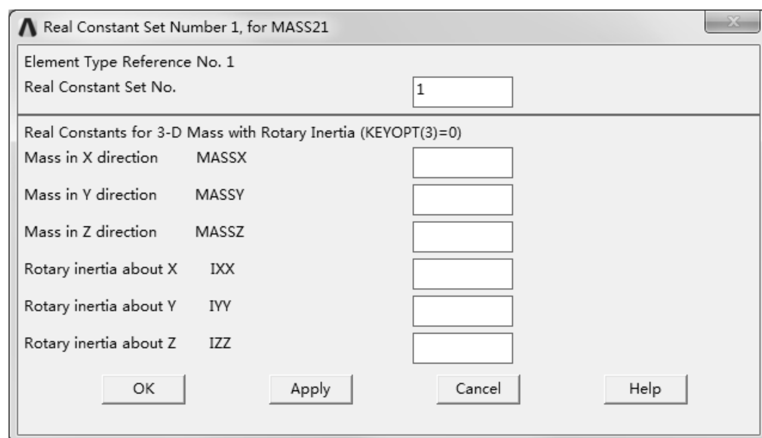


图 2-47 Real Constant Set Number1, for MASS21 对话框

注意：① 进行动力学分析时，必须准确定义质量单元的质量和转动惯量。

② 当质量单元用作辅助单元，而不需考虑其质量和转动惯量时，可定义一项实常数为极小值，如 MASSX=1E-9。

2.6 线性弹簧单元 COMBIN14

线性弹簧单元用于模拟简单的弹簧效应，并可包含阻尼特性。ANSYS 提供了线性弹簧单元 COMBIN14。

2.6.1 线性弹簧单元描述

COMBIN14 单元具有轴向拉压或绕轴扭转的能力，由两个节点构成。轴向弹簧-阻尼器选项表示沿轴线的纯拉伸或纯压缩单元，它的每个节点至多有 3 个自由度，即沿节点坐标系 *x*、*y*、*z* 方向的平动，不考虑弯曲或者扭转。扭转弹簧-阻尼器选项表示绕轴线的纯扭转单元，它的每个节点有 3 个自由度，即绕节点坐标系 *x*、*y*、*z* 轴的旋转，不考虑弯曲或者轴向荷载。图 2-48 为弹簧单元 COMBIN14 的几何构型。

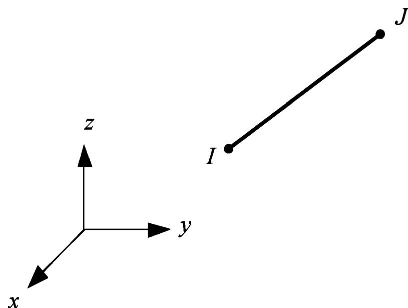


图 2-48 COMBIN14（和 COMBIN39）单元的几何构型

COMBIN14 单元本身没有质量，但可利用适当的质量单元（MASS21）来增加质量。

2.6.2 设置单元选项

图 2-49 为 COMBIN14 element type options 对话框。COMBIN14 提供了单元选项 K1、K2 和 K3，其中 K3 是最重要的单元选项，用于控制单元的行为。ANSYS 提供了 3 种选项：三维轴向弹簧-阻尼器（K3=0, 3-D longitudinal），这是默认选项；三维扭转弹簧-阻尼器（K3=1, 3-D torsional）；二维轴向弹簧-阻尼器（K3=2, 2-D longitudinal），注意二维单元必须位于 x-y 平面内。

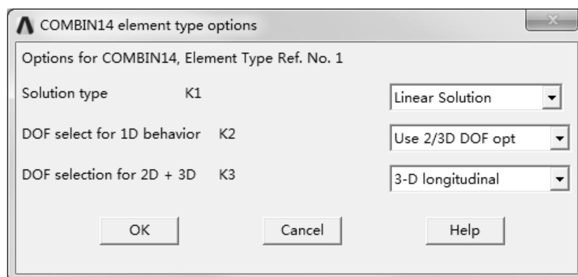


图 2-49　COMBIN14 element type options 对话框

2.6.3 设置实常数

实常数用于定义 COMBIN14 的弹性常数，如图 2-50 所示。若只考虑弹簧的刚度，则只需定义实常数 K。对于轴向拉压弹簧，K 的单位为力/长度，如 N/m；对于绕轴扭转弹簧，K 的单位为力×长度/弧度，如 N・m/rad。

注意：轴向拉压弹簧仅具有轴向刚度，绕轴扭转弹簧仅具有绕轴扭转的刚度。

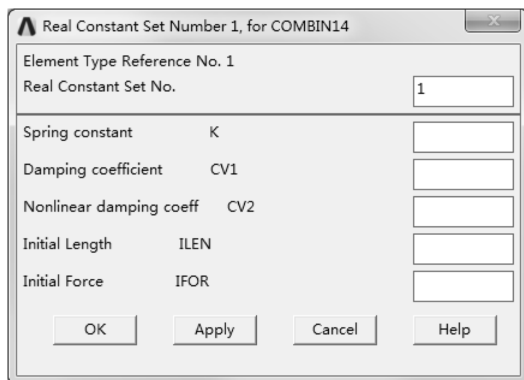


图 2-50　Real Constant Set Number1, for COMBIN14 对话框

2.7 非线性弹簧单元 COMBIN39

非线性弹簧单元用于模拟复杂的弹簧效应，不包含阻尼特性。ANSYS 提供了非线性弹簧单元 COMBIN39。

2.7.1 非线性弹簧单元描述

COMBIN39 是一种具有非线性功能的弹簧单元，具有轴向拉压或绕轴扭转的能力，由两个节点构成。轴向弹簧选项表示沿轴线的纯拉伸或纯压缩单元，它的每个节点至多有 3 个自由度，即沿节点坐标系 x、y、z 方向的平动，不考虑弯曲或者扭转。扭转弹簧选项表示绕轴线的纯扭转单元，它的每个节点有 3 个自由度，即绕节点坐标系 x、y、z 轴的旋转，不考虑弯曲或者轴向荷载。图 2-48 为弹簧单元 COMBIN39 的几何构型。

COMBIN39 单元本身没有质量，但可利用适当的质量单元（MASS21）来增加质量。

2.7.2 设置单元选项

图 2-51 为 COMBIN39 element type options 对话框。COMBIN39 提供了单元选项 K1、K2、K3、K4 和 K6，其中 K4 是最重要的单元选项，用于控制单元的行为。ANSYS 提供了 4 种选项：使用 K3（K4=0, Use K3 option），这是默认选项；三维轴向弹簧（K4=1, UX/UY/UZ）；三维扭转弹簧（K4=2, ROTX/ROTY/ROTZ）；二维轴向弹簧（K4=3, UX/UY），注意二维单元必须位于 x-y 平面内。

对于仅受拉弹簧，除设置相应的 K4 之外，还应设置 K2=1（On compres resist）。

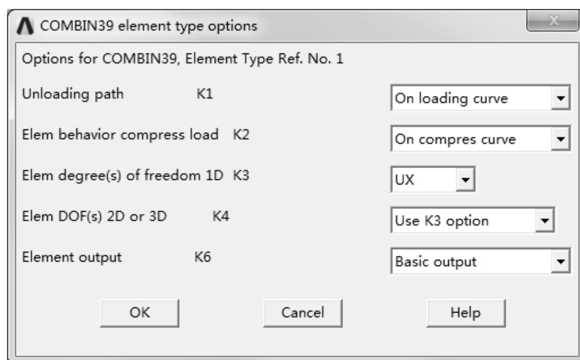


图 2-51 COMBIN39 element type options 对话框

2.7.3 设置实常数

实常数用于定义 COMBIN39 的弹性常数，即刚度，如图 2-52 所示。COMBIN39 单元通过定义广义力-变形曲线来定义弹簧刚度，如力-相对位移、扭矩-相对转角。下面以轴向弹簧为例，说明实常数的设置要求。

（1）拉压刚度相同

仅须定义拉伸刚度数据，若为线性弹簧（与 COMBIN14 相同），则只须定义第一组数据，即相对位移 D1 和力 F1。

（2）非线性弹簧

须定义完整的数据对，且位移必须由小到大。

（3）拉伸/压缩刚度不同

须定义所有的刚度数据，且位移必须由小到大，由负到正（负为压缩，正为拉伸）。



图 2-52 Real Constant Set Number1, for COMBIN39 对话框

（4）仅受拉弹簧

按实际情况定义刚度数据，且刚度数据中不能包含负的位移。

注意：① 轴向拉压弹簧仅具有轴向刚度，绕轴扭转弹簧仅具有绕轴扭转的刚度。

② 此弹簧为非线性单元，计算中包含非线性。

2.8 预紧力单元 PRETS179

预紧力单元用于模拟螺栓等结构的预紧力。ANSYS 提供了预紧力单元 PRETS179。

2.8.1 预紧力单元描述

PRETS179 单元由 3 个节点 *I*、*J*、*K* 构成，用于定义已进行了网格划分结构内的二维或三维预紧截面，该结构可以由任意二维或三维结构单元（实体、梁、板壳、管或杆）建立。PRETS179 单元只有一个平动自由度 UX，代表定义的预紧力方向。ANSYS 对问题的几何条件进行换算，将预紧力施加于预紧力方向，而不考虑模型是如何定义的。图 2-53 为预紧力单元 PRETS179 的几何构型。

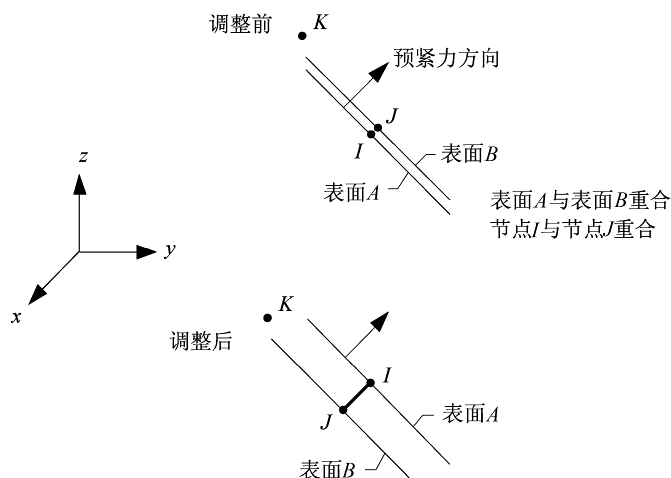


图 2-53 PRETS179 单元的几何构型

节点 *I* 和 *J* 最初是重合的，它们应该具有相同的节点坐标系。对每个预紧截面，预紧单元的节点顺序是重要的。节点 *I* 必须位于表面 *A*，而节点 *J* 必须位于表面 *B*。

节点 *K* 是预紧节点，用于施加预紧力。节点 *K* 可以在空间的任何地方，但它的节点坐标系必须是总体笛卡儿坐标系。每个预紧区域只有一个预紧节点，它只应连接预紧单元。

预紧节点 *K* 只有自由度 UX，用来定义在预紧载荷方向上表面 *A* 和表面 *B* 间的相对位移。滑动运动被自动阻止。

预紧载荷可用 SLOAD 命令施加，在求解时，这种载荷将覆盖任何采用 F 和 D 命令施加于此节点上的载荷。PRETS179 单元仅能使用拉伸/压缩载荷，忽略弯曲或扭转载荷。

2.8.2 定义预紧力方向

在建立 PRETS179 单元时，应始终记住预紧力载荷的方向与表面 *A* 相关。预紧力方向由预紧力截面数据 NX、NY、NZ 定义（见图 2-54），NX、NY、NZ 定义的方向矢量就代表预紧力方向。预紧力方向是常数且不随着大变形而更新。预紧力方向可以在载荷步间由截面数据改变，对大挠度问题，可以追踪挠度并且变换预紧力方向。

涉及预紧力的计算通常也包含接触非线性，第 15.7 节给出了螺栓预紧力分析的实例。

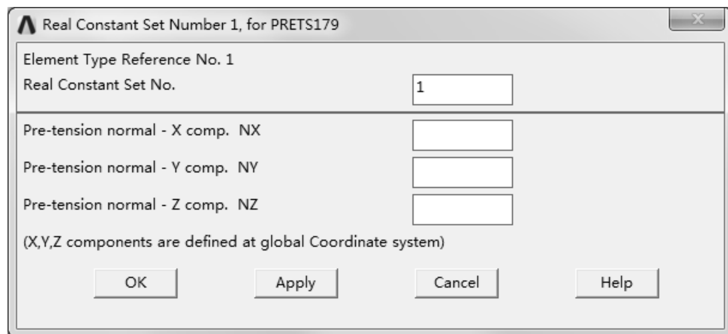


图 2-54 Real Constant Set Number1, for PRETS179 对话框

2.9 刚性杆/梁单元 MPC184–Link/Beam

刚性杆/梁单元可以用来模拟两个变形体之间的刚性约束，或者模拟传递力和力矩的刚性部件。ANSYS 提供了刚性杆/梁单元 MPC184–Link/Beam。

2.9.1 刚性杆/梁单元描述

MPC184–Link/Beam 单元由两个节点构成，如图 2–55 所示。节点 *I* 到节点 *J* 定义了单元的 *x* 轴方向，但通常不必关注单元坐标系。对于刚性杆单元，每个节点具有 3 个平动自由度；对于刚性梁单元，每个节点具有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。刚性杆/梁单元不仅适用于线性分析，也适用于大转动、大应变等非线性分析。

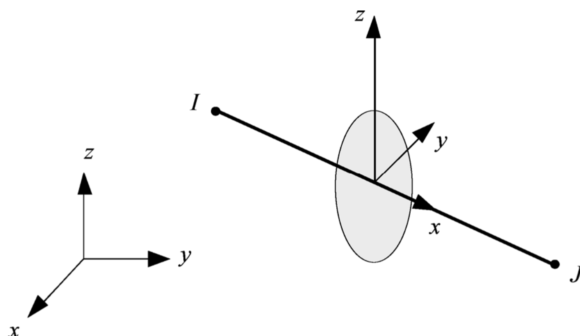


图 2–55 MPC184–Link/Beam 单元的几何构型

2.9.2 设置单元选项

图 2–56 和图 2–57 为 MPC184 element type options 对话框。MPC184–Link/Beam 提供了单元选项 K1 和 K2，用于定义 MPC184 的单元类型和单元算法。

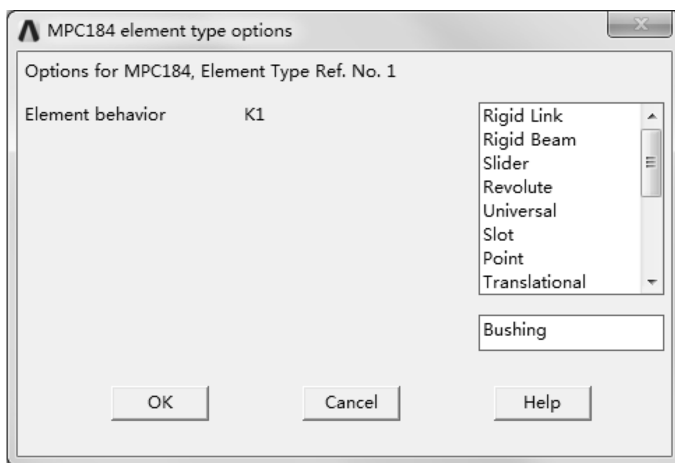


图 2–56 MPC184 element type options 对话框 1

K1 用于定义单元类型，K1=0（Rigid Link）表示 MPC184 刚性杆单元，这是默认选项；K1=1（Rigid Beam）表示 MPC184 刚性梁单元。

K2 用于控制单元算法，即引入运动约束的方法。ANSYS 支持两种算法：直接消去法（K2=0, Direct Elimination），这是默认选项，这种算法引入内部多点约束（MultiPoint Constraint，MPC）方程，并消除 MPC 方程中的从节点（Dependent Node）的自由度，仅保留主节点（Independent Node）的自由度；拉格朗日乘子法（K2=1, Lagrange Multiplier），这种算法引入拉格朗日乘子，保留所有从节点和主节点的自由度。一般地，拉格朗日乘子法的使用限制更少，应用范围更广，推荐为首选设置。

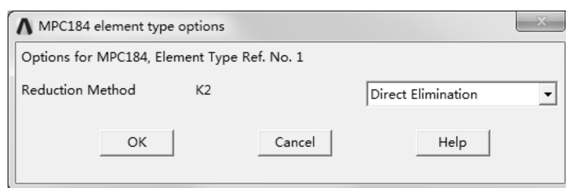


图 2-57　MPC184 element type options 对话框 2

注意：① 使用 MPC184-Link/Beam 单元时，应小心谨慎，防止系统过约束。

② 除 MPC184-Link/Beam 单元支持直接消去法和拉格朗日乘子法外，其余所有 MPC184 单元只支持拉格朗日乘子法。

2.10　铰链单元 MPC184-Revolute

铰链连接广泛应用于汽车、机器人、生物工程和其他行业。ANSYS 提供的铰链单元 MPC184-Revolute 可用于模拟铰链连接。

2.10.1 铰链单元描述

MPC184-Revolute 单元由两个重合节点组成，每个节点具有 6 个自由度，即 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。顾名思义，铰链单元只允许绕一个转动轴转动。该单元支持大挠度分析。图 2-58 为铰链单元 MPC184-Revolute 的几何构型。

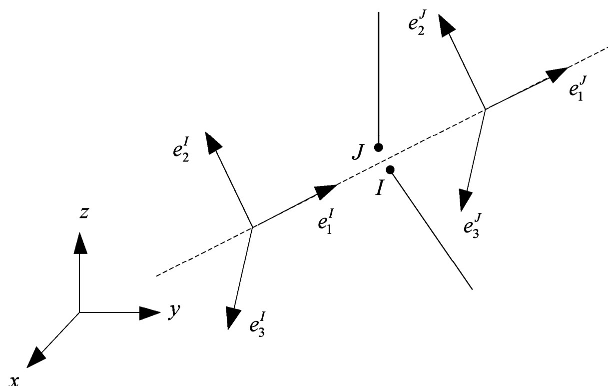


图 2-58　MPC184-Revolute 单元的几何构型

图 2-58 中，e_1^I、e_2^I、e_3^I 分别为 *I* 节点的局部笛卡儿坐标方向；e_1^J、e_2^J、e_3^J 分别为 *J* 节点的局部笛卡儿坐标方向。

2.10.2 定义节点局部坐标系

对于铰链单元，必须定义 *I* 节点的局部笛卡儿坐标系，以确定销轴方向。*J* 节点的局部笛卡儿坐标系默认与 *I* 节点相同，可不定义。铰链的载荷和边界条件（命令为 FJ 和 DJ）是通过局部坐标系施加的，这些局部坐标系将跟随节点转动而转动。因此，铰链单元特别适合用于多体分析。

2.10.3 设置单元选项

图 2-59 和图 2-60 为 MPC184 element type options 对话框。MPC184-Revolute 提供了单元选项 K1 和 K4，用于定义 MPC184 单元类型和销轴方向。

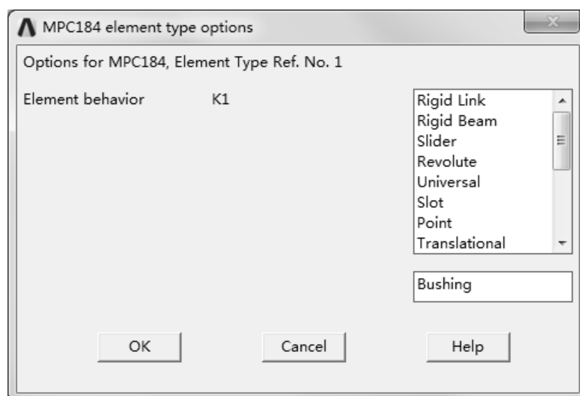


图 2-59 MPC184 element type options 对话框 1

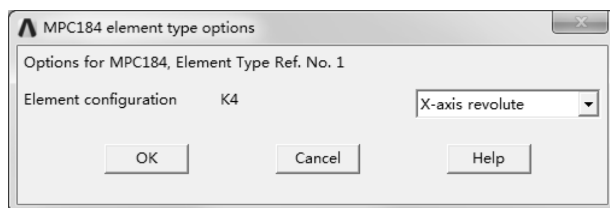


图 2-60 MPC184 element type options 对话框 2

K1 用于定义单元类型，K1=6（Revolute）表示 MPC184 铰链单元。

K4 用于定义销轴方向，ANSYS 支持两种方法：K4=0（X-axis revolute）为默认设置，表示局部坐标方向 e_1 为销轴方向（见图 2-58）；K4=1（Z-axis revolute）表示局部坐标方向 e_3 为销轴方向。

2.10.4 定义铰链截面

图 2-61 为 Create and Modify Joint Sections 对话框，用于定义铰链截面。铰链截面可用于

指定 *I* 节点和 *J* 节点的局部坐标系，也可对铰链施加一些控制，如限制转动范围（Stops）或锁定转动（Locks）。

第 16.3 节给出了铰链单元的应用实例。

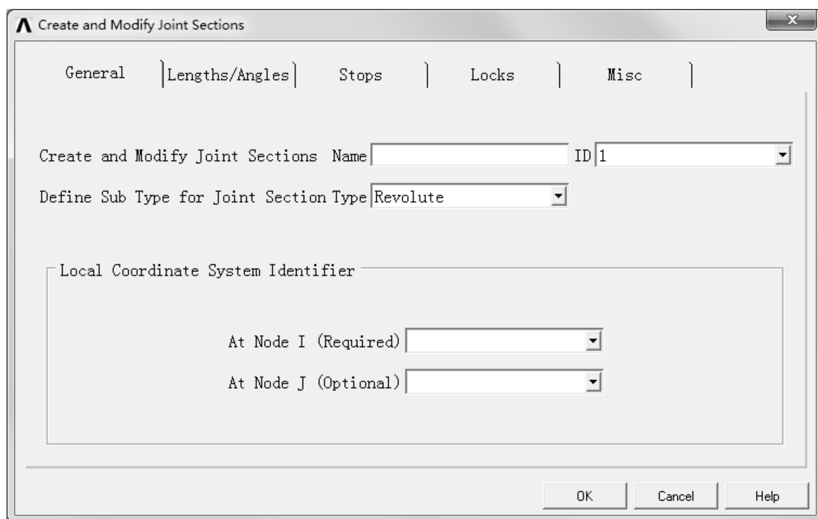


图 2-61 Create and Modify Joint Sections 对话框

2.11 目标单元 TARGE170 与接触单元 CONTA173、CONTA174 和 CONTA175

目标单元和接触单元通常配合使用，用于模拟接触问题或定义 MPC 算法。对于三维问题，应用最多的是目标单元 TARGE170，接触单元 CONTA173、CONTA174 和 CONTA175。

TARGE170 单元表示三维目标面，通过共享实常数号与相关接触单元（CONTA173、CONTA174 和 CONTA175 等）联合使用。TARGE170 对于不同的应用具有不同的单元形式，常用的形式为低阶/高阶三角形、低阶/高阶四边形和点（PILOT）。除 PILOT 具有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度外，其余形式的单元节点只有 3 个平动自由度。

CONTA173 和 CONTA174 单元覆盖于接触面，通过共享实常数号与 TARGE170 单元联合使用。CONTA173 单元具有低阶四边形或三角形的形式（由下伏单元决定），CONTA174 单元具有高阶四边形或三角形的形式（由下伏单元决定）。在结构分析中，CONTA173 和 CONTA174 单元的每个节点只有 3 个平动自由度。

CONTA175 是点单元，位于接触面表面节点，可用于模拟面-面接触和点-面接触等问题。对于绑定和不分离接触类型，支持高阶下伏单元；对于其余接触类型，推荐采用低阶下伏单元。在三维结构分析中，单元节点只有 3 个平动自由度。

ANSYS 使用若干单元选项和实常数控制目标单元和接触单元的行为，其具体应用详见第 4 章和第 15 章。

2.12 刚性区域 CERIG

刚性区域常用于各种连接定义。ANSYS 提供的 CERIG 命令类似于 NASTRAN 中的 RBE2，通过自动建立约束方程的方式定义刚性区域。当连接区域具有较大刚度时，可使用刚性区域 CERIG。

对于三维问题，默认情况下，每个刚性区域将生成 6 个约束方程。这些约束方程定义了总体笛卡儿坐标系的 6 个刚体运动，并假设刚性区域的所有节点都存在 6 个自由度，即 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY 和 ROTZ。

定义刚性区域时，须指定一个主节点和从节点（集），并指定须耦合的自由度。若须模拟刚性连接，则耦合节点具有所有自由度；若须模拟运动关系，如铰接，则不耦合相应自由度。

注意：① 主节点必须是实际存在的单元节点。如果主节点没有依附单元节点，则可在主节点建立质量单元，并赋予极小的质量。

② 刚性区域使用的约束方程基于小变形理论，应谨慎用于大变形分析。

③ 由于形成刚性区域，可能引起局部应力集中，应小心使用。

2.13 柔性连接 RBE3

柔性连接常用于各种连接定义。ANSYS 提供的 RBE3 命令通过自动建立约束方程的方式，将作用于主节点的力和力矩传递给从节点，不建立刚性区域，属于柔性连接。当连接区域具有较小刚度时，可使用柔性连接 RBE3。

定义柔性连接时，须指定一个主节点和从节点集，并指定约束方程中将使用的自由度和权重，以传递相应的力和力矩。

与刚性区域相同的是，柔性连接可以传递力和力矩，也包括质量和惯性力。与刚性区域不同的是，刚性区域内的所有节点不产生相对位移，只产生刚体运动，而柔性连接不对系统增加任何刚度，从节点之间可以产生相对位移，主节点的运动是从节点运动的加权平均。

注意：① 为正确表达转动效果，从节点集至少应形成一个四边形的四个顶点。

② 一般地，权重系数保持为默认值 1 即可满足工程需要。

③ 主节点必须是实际存在的单元节点。如果主节点没有依附单元节点，则可在主节点建立质量单元，并赋予极小的质量。

④ 柔性连接使用的约束方程基于小变形理论，应谨慎用于大变形分析。

第 3 章　基于 HyperMesh 的有限元网格划分



有限元网格的好坏直接关系到计算与分析的准确度，是有限元分析的关键。良好的网格是提高仿真可信度的前提，粗糙的网格将得到不精确，甚至错误的结果。

一般来说，CAE 分析工程师 80%的时间都花费在有限元网格模型的建立和修改上。一个功能强大、使用方便的有限元前处理工具，对于提高有限元分析工作的质量和效率具有十分重要的意义。在 CAE 领域，HyperMesh 具备强大的有限元前处理功能，已成为业界公认的杰出前处理软件。

本章基于 ANSYS 模板，主要介绍了 HyperMesh 的网格划分方法，并给出了 5 个实例，涵盖模型导入及几何清理、二维网格划分、四面体网格划分、六面体网格划分和网格质量检查及编辑。

3.1　HyperMesh 的用户界面

可通过程序菜单启动 HyperMesh，以 Windows 7 64 位操作系统为例，执行开始→所有程序→Altair HyperWorks→HyperMesh 菜单命令。首次启动 HyperMesh，将弹出 User Profiles 对话框，需要用户指定求解器模板。本书基于 ANSYS 求解器，故选择 ANSYS 模板，同时，取消勾选 Always show at start-up 复选框，并单击 OK 按钮，以设置默认加载 ANSYS 模板，如图 3-1 所示。

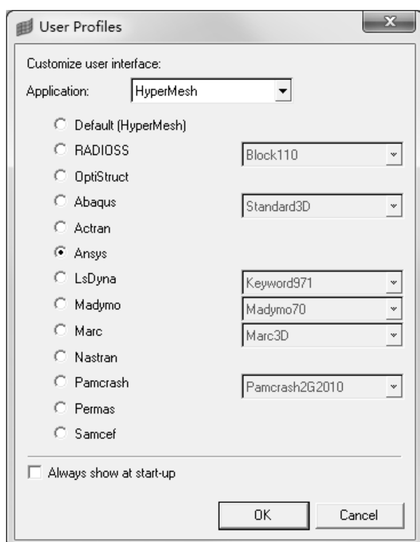


图 3-1　加载 ANSYS 模板

提示：也可以在启动 HyperMesh 后，通过执行 Preferences→User Profiles 菜单命令设置求解器模板。

HyperMesh 的主界面主要包含标题栏（Title Bar）、菜单栏（Menu Bar）、工具栏（Toolbars）、标签区（Tab Area）、图形区（Graphics Area）、主菜单（Main Menu）、主菜单页（Main Menu Pages）和状态栏（Status Bar）几个区域，如图 3-2 所示。

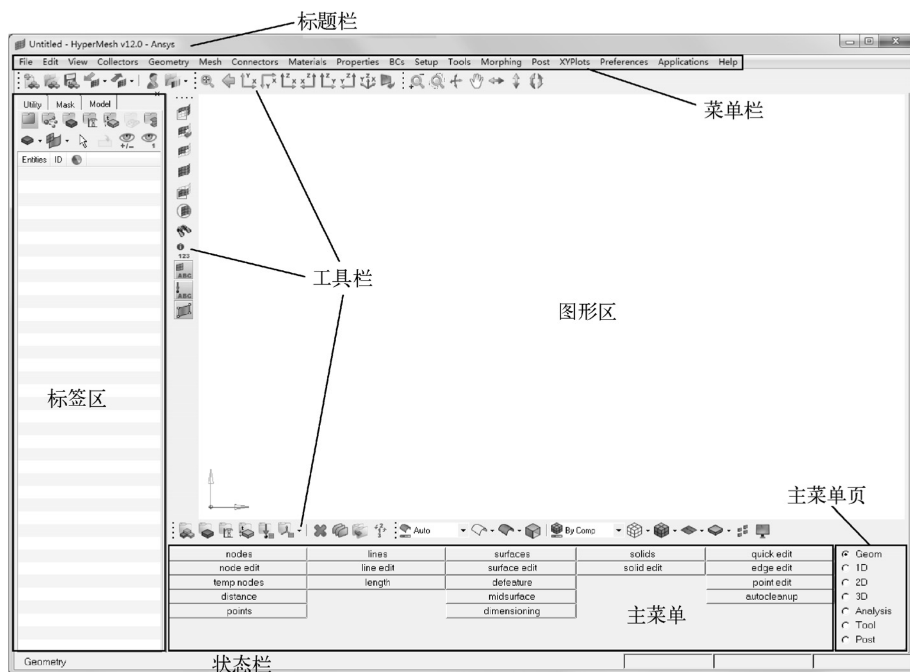


图 3-2　HyperMesh 的主界面

（1）标题栏

标题栏位于主界面的最上方。它显示了当前使用的 HyperMesh 版本号、模板和用户正在处理的文件名称。

（2）菜单栏

菜单栏位于标题栏的下方。就像许多应用程序提供的菜单栏一样，当用户单击这些菜单时，就会出现下一级的菜单选项，通过下一级菜单选项可进入 HyperMesh 不同的功能模块。

（3）工具栏

工具栏位于图形区的周围。这些按钮为常用功能提供了快捷途径，如改变显示选项等，它们也可被拖放到图形区的四周。

（4）标签区

标签区（选项卡）位于图形区的左侧，其中列出了一些有用的工具，如 Model 选项卡和 Utility 选项卡等。

1）Model 选项卡。Model 选项卡包含了 Model 浏览器。Model 浏览器以层树方式显示模型的内容，可以通过 Model 浏览器创建或编辑各种对象，并对其进行组织和显示控制。

2）Utility 选项卡。Utility 选项卡的内容随着求解器模板的改变而变化。对于 ANSYS 模板，默认的 Utility 选项卡如图 3-3 所示。Ansys Tools 页面包含与 ANSYS 模型设置相关的宏，提供了最重要的工具，可为 ANSYS 定义材料、横截面、实常数、单元类型等，还可为 ANSYS 创建接触对；Geom/Mesh 页面包含与创建、编辑几何模型和有限元网格相关的宏；User 页面仅包含用户自己创建的宏，默认为空白；Disp 页面仅包含清除临时节点（Clear Temp Nodes）的宏；QA/Model 页面包含与单元检查和载荷相关的宏。

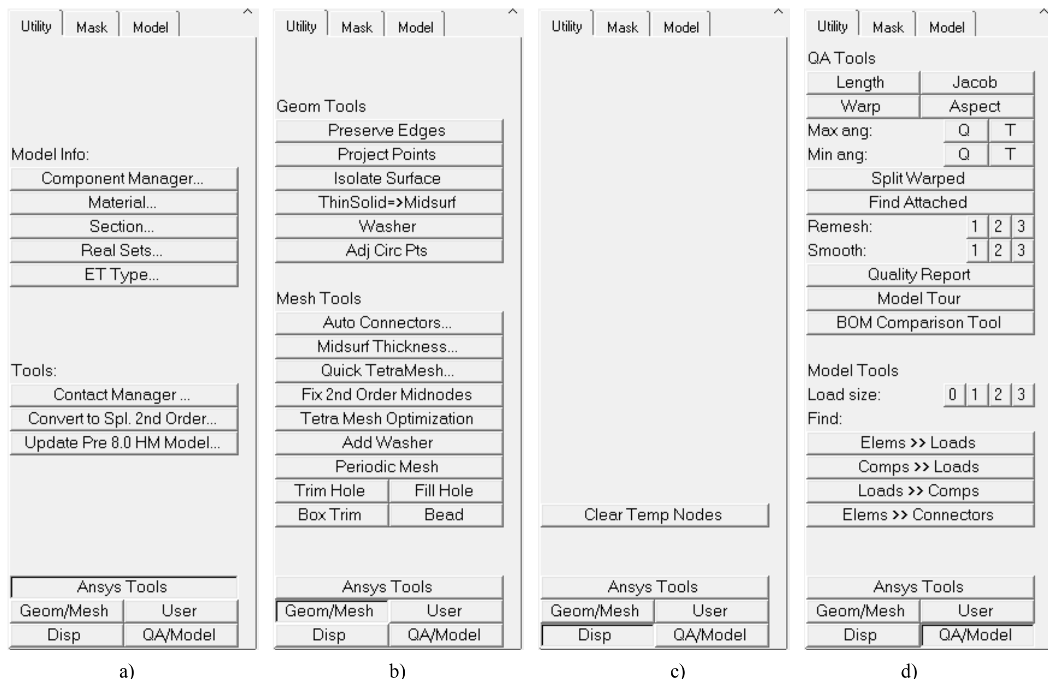


图 3-3 Utility 选项卡

a) ANSYS Tools 页面 b) Geom/Mesh 页面 c) Disp 页面 d) QA/Model 页面

（5）图形区

图形区位于标题栏的右下方，它占据着 HyperMesh 主界面最大的区域。图形区是显示模型的区域，用户可以实时地在三维空间中对模型进行操作。除显示模型外，在图形区也可交互式地选择实体。

（6）主菜单

主菜单位于图形区的下方，显示每一个页面上可用的功能，可通过单击相应的按钮来实现用户需要的功能。

（7）主菜单页

主菜单页位于主菜单的右侧。主菜单页将主菜单按功能进行分组，主菜单一次仅能显示一个页面，如图 3-4～图 3-10 所示。Geom 页面包含与创建和编辑几何模型有关的工具；1D、2D、3D 页面分别包含一维、二维、三维单元的创建和编辑工具；Analysis 页面包含分析问题以及边界条件定义的工具；Tool 页面包含多种模型编辑以及检查工具；Post 页面包含后处理工具。

（8）状态栏

状态栏位于 HyperMesh 主界面的最下方。状态栏的左端显示了当前主菜单页，默认情况下为 Geometry。状态栏右端的 3 个区域分别显示了当前调用的库文件、当前组件集和当前载荷集，默认情况下，3 个区域为空白。用户在使用 HyperMesh 的过程中，任何提示、警告和错误信息都会在状态栏中显示。

nodes	lines	surfaces	solids	quick edit	(•) Geom
node edit	line edit	surface edit	solid edit	edge edit	( ) 1D
temp nodes	length	defeature		point edit	( ) 2D
distance		midsurface		autocleanup	( ) 3D
points		dimensioning			( ) Analysis
					( ) Tool
					( ) Post

图 3-4　Geom 页面

masses	bars	connectors	line mesh	edit element	( ) Geom
	rods	spotweld	linear 1d	split	(•) 1D
	rigids	HyperBeam		replace	( ) 2D
	rbe3			detach	( ) 3D
	springs			order change	( ) Analysis
	gaps		vectors	config edit	( ) Tool
		ET Types	systems	elem types	( ) Post

图 3-5　1D 页面

planes	ruled	connectors	automesh	edit element	( ) Geom
cones	spline	HyperLaminate	shrink wrap	split	( ) 1D
spheres	skin	composites	smooth	replace	(•) 2D
torus	drag		qualityindex	detach	( ) 3D
	spin		elem cleanup	order change	( ) Analysis
	line drag		mesh edit	config edit	( ) Tool
	elem offset	ET Types		elem types	( ) Post

图 3-6　2D 页面

solid map	drag	connectors	tetramesh	edit element	( ) Geom
linear solid	spin		smooth	split	( ) 1D
solid mesh	line drag		CFD tetramesh	replace	( ) 2D
	elem offset			detach	(•) 3D
				order change	( ) Analysis
				config edit	( ) Tool
		ET Types		elem types	( ) Post

图 3-7　3D 页面

vectors	load types			control cards	( ) Geom
systems	constraints				( ) 1D
	equations	temperatures	entity sets	load steps	( ) 2D
	forces	flux	blocks		( ) 3D
	moments	load on geom			(•) Analysis
	pressures				( ) Tool
				solver	( ) Post

图 3-8　Analysis 页面

assemblies	find	translate	check elems	numbers	( ) Geom
organize	mask	rotate	edges	renumber	( ) 1D
color	delete	scale	faces	count	( ) 2D
rename		reflect	features	mass calc	( ) 3D
reorder		project	normals	tags	( ) Analysis
convert		position	dependency	HyperMorph	(•) Tool
build menu		permute	penetration	shape	( ) Post

图 3-9　Tool 页面

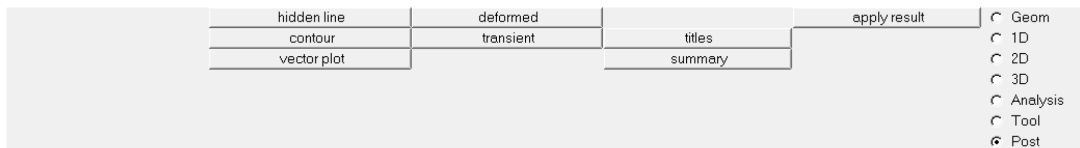


图 3-10　Post 页面

3.2　模型导入及几何清理实例

几何模型通常由专业的 CAD 软件建立，然后再导入到 HyperMesh 中。为减少有限元前处理的工作量，最好的办法是采用 CAD 软件直接建立适合有限元分析的 CAD 模型。然而，结构工程师建立的 CAD 模型需要精确表达几何结构，通常会包含某些细小特征，如圆角、倒角和小孔等。所以，将 CAD 模型导入 HyperMesh 之后，通常还需要进行几何清理，以便于网格划分。

HyperMesh 提供了丰富的工具（位于 Geom 页面，如图 3-4 所示），可以实现从三维模型创建、编辑以及对已有模型（包括从 CAD 软件导入的模型，如图 3-11 所示）进行几何清理的多种操作。通过这些工具，可以完成拓扑修复、拓扑改进、中面抽取、简化细节等工作。下面通过实例介绍如何利用 HyperMesh 进行几何清理。



图 3-11　HyperMesh 的几何导入面板

STEP 1 打开模型文件

1）启动 HyperMesh，并选择 ANSYS 模板。

2）单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\下找到 clip_repair.hm 文件并打开，模型如图 3-12 所示。

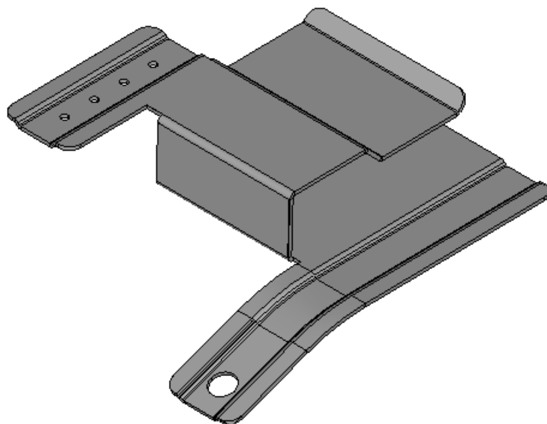


图 3-12　clip_repair.hm 模型

STEP 2 以拓扑方式观察模型并通过渲染检查模型的完整性

这一步是为了检查模型中是否存在错误的连接关系、缺失或重复的表面。

1）在 Geom 页面中，选择 autocleanup 面板。此时，模型边沿依据其拓扑状态进行渲染。

2）单击 Wireframe Geometry 按钮，模型以线框模式显示。

3）单击 Visualization Options 按钮，调出视图工具。视图工具控制模型表面和边沿的显示方式，模型表面可以被渲染或者线框化。这个菜单里的复选框控制不同边界和硬点的显示状态。

4）勾选 Free 复选框，取消勾选其余复选框。此时，只有自由边显示在图形区，如图 3-13 所示。观察自由边并记住它们的位置，自由边（红色线条）表示此处具有不正确的连接关系，或者是有间隙。注意那些闭环的自由边，这些位置可能是缺失的面。

5）勾选 Non-manifold 复选框，取消勾选其余复选框。此时，只有 T 形边（黄色线条）显示在图形区，如图 3-14 所示。T 形边是指一条边被两个或两个以上的面共享。本实例模型中有两个闭合的 T 形边，说明在这些位置可能含有重复的面。

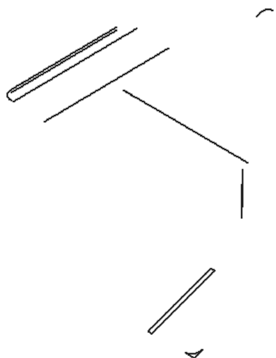


图 3-13　模型中自由边的位置

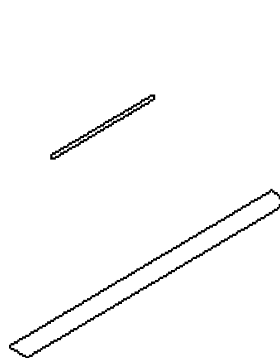


图 3-14　模型中 T 形边的位置

6）勾选除 Show line directions 外的复选框，单击 Close 按钮，退出视图工具窗口。

7）单击 return 按钮，退出 autocleanup 面板。

8）单击 Shaded Geometry and Surface Edges 按钮，模型以渲染模式显示。

9）再次调出视图工具，仅勾选 Free 和 Non-manifold 复选框，可以看到模型中有问题的地方被标记出来了。图 3-15 为局部视图，包含了一个悬浮面和一个缺失面。

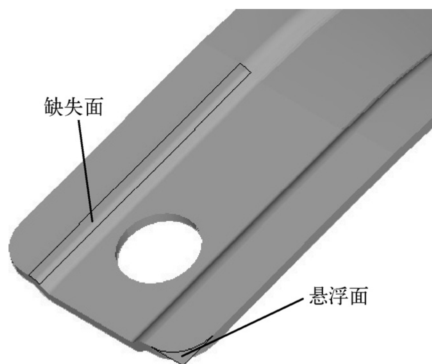


图 3-15　悬浮面和缺失面

STEP 3 删除圆角处的悬浮面

1）按快捷键〈F2〉，进入 delete 面板。

2）在 delete 面板中，单击 elems 左边的下拉按钮，弹出下拉列表，选择 surfs。

3）在图形区，选择圆角处的悬浮面，再单击 delete entity 按钮。

4）单击 return 按钮，返回主面板。

STEP 4 填充缺失面

1）在 Geom 页面中，选择 surfaces 面板，再选择 Spline/Filler 子面板。不勾选 Keep tangency 复选框，如图 3-16 所示。Keep tangency 功能可以保证新创建的面与相邻面平滑过渡。

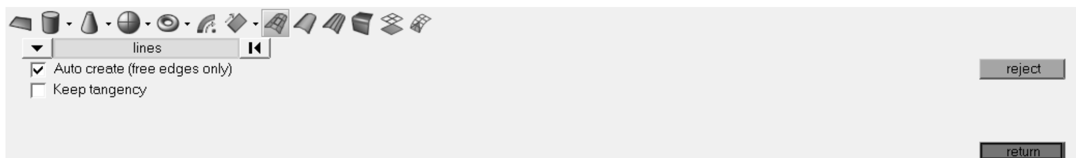


图 3-16　Spline/Filler 子面板

2）确保对象选择器设置为 lines。

3）确保勾选 Auto create（free edges only）复选框。Auto create 选项可以简化缺失面边线的选取过程，一旦选取其中一条线，HyperMesh 将自动选取闭环回路中剩余的几条边线，然后创建曲面。

4）选取图 3-17 中一个缺口处的一条边线，HyperMesh 将自动创建面填充这个缺口。

5）重复步骤 4），为另一个缺口创建填充面。

6）单击 return 按钮，返回主面板。

STEP 5 设置全局几何清理容差为 0.01

1）按快捷键〈O〉，进入 options 面板。

2）在 geometry 子面板中，将 cleanup tol 设置为 0.01，缝合间隙小于 0.01 的自由边。

3）单击 return 按钮，返回主面板。

STEP 6 使用 equivalence 工具一次性缝合多个自由边

1）在 Geom 页面中，选择 edge edit 面板，再选择 equivalence 子面板。

2）勾选 equiv free edge only 复选框。

3）单击 surfs 按钮，在弹出选项中选择 all。

4）确认 cleanup tol 为 0.01。

5）单击 equivalence 按钮，自动合并间隙小于 0.01 的自由边。

经过这一步，模型中大部分红色自由边被缝合成绿色的共享边（此时被隐藏），少数未被缝合的自由边是因为其间距大于容差上限 0.01。

STEP 7 使用 toggle 工具逐个缝合自由边

1）进入 toggle 子面板。

2）将 cleanup tol 设置为 0.1。

3）单击图 3-18 中的任一条红色自由边，当自由边被选中后，它将从红色变为绿色（此时被隐藏），表示已被缝合成共享边。

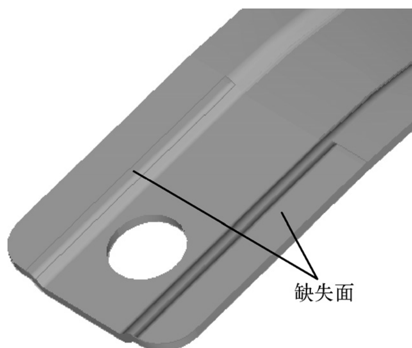


图 3-17 需要填补的缺失面

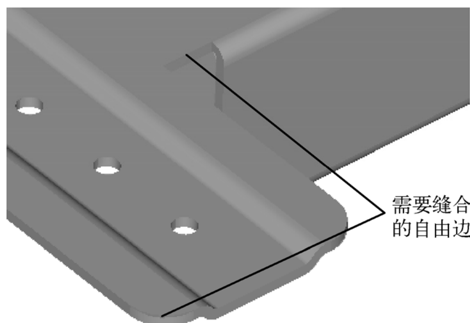


图 3-18 需要缝合的自由边

4）使用 toggle 工具缝合模型中的另外一条自由边。

STEP 8 使用 replace 工具修复余下的自由边

1）进入 replace 面板。

2）激活 moved edge 下面的 line 按钮，选择图 3-19 中左边的自由边。此时，retained edge 下面的 line 按钮被激活，选择右边的自由边。

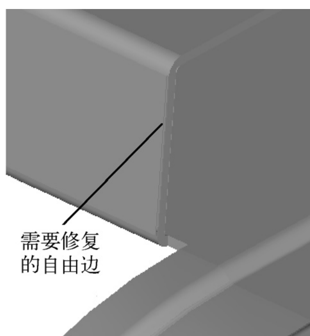


图 3-19 需要修复的自由边

3）将 cleanup tol 设置为 0.1。

4）单击 replace 按钮。HyperMesh 弹出提示信息“Gap=（0.200018）. Do you still wish to replace?”。

5）单击 Yes 按钮，执行缝合操作。

6）单击 return 按钮，返回主面板。

STEP 9 寻找并删除所有重合面

1）在 Geom 页面中，选择 defeature 面板，再选择 duplicates 子面板。

2）单击 surfs 按钮，在弹出的选项中选择 displayed。

3）将 cleanup tol 设置为 0.1。

4）单击 find 按钮。此时，状态栏将显示“2 duplicate surfaces were found”。

5）单击 delete 按钮，删除重复的面。

6）单击 return 按钮，返回主面板。

STEP 10 检查并保存模型

1）单击 Visualization Options 按钮，调出视图工具，勾选除 Show line directions 外的复选框。

2）在 Geom 页面中，选择 autocleanup 面板，再单击 Wireframe Geometry 按钮，模型以线框模式显示。可以看到，模型中所有的边沿均显示为绿色的共享边，表示模型已被修复成闭合的几何体。

3）单击 return 按钮，返回主面板。

4）如果需要，保存模型，并命名为 clip_repair_completed.hm。

3.3 一维网格划分

在有限元分析领域，一维网格是一个非常重要的概念。典型的一维网格包括杆单元、梁单元、刚性单元和弹簧阻尼单元等。HyperMesh 定义的一维单元包含了点单元和线单元。对于 ANSYS，点单元可表示 MASS21、TARGE170 和 CONTA175 等，线单元可表示 COMBIN14、LINK180、MPC184、BEAM188、PRETS179、CERIG 和 RBE3 等。

HyperMesh 提供了丰富的工具（位于 1D 页面，见图 3-5 所示），可以实现各种一维单元的创建和编辑。由于 ANSYS 求解器的特殊性，可以先利用 1D 页面中的工具划分网格，再利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 为网格赋予单元、实常数、横截面和材料属性。

对于 ANSYS 模板，HyperMesh 的网格划分具有很大的灵活性，同一个网格划分工具可以创建不同类型的单元，同一种单元也可以采用不同的工具进行划分。对于仅由一个节点构成的点单元，如 MASS21、TARGE170（PILOT）和 CONTA175 等，可以利用 1D 页面的 masses 面板（见图 3-20）创建单元。对于由两个节点构成的线单元，如 COMBIN14、LINK180 和 MPC184 等，可以利用 1D 页面的 rods 面板（见图 3-21）或 1D 页面的 springs 面板（见图 3-22）创建单元。对于由 3 个节点构成的线单元（其中一个节点为方向节点），如 BEAM188 和 PRETS179，可以利用 1D 页面的 bars 面板（见图 3-23）创建单元。对于刚性连接 CERIG，可以利用 1D 页面的 rigids 面板（见图 3-24）创建单元。对于柔性连接 RBE3，可以利用 1D 页面的 rbe3 面板（见图 3-25）创建单元。

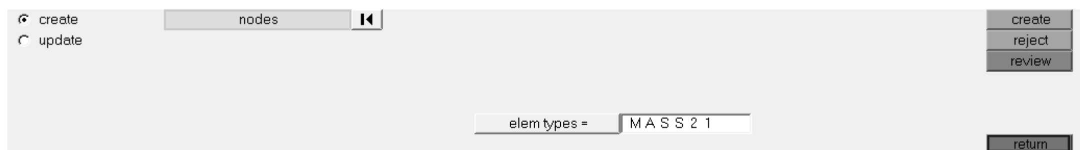


图 3-20　masses 面板

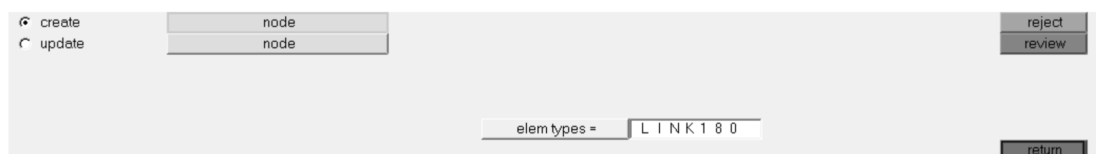


图 3-21　rods 面板

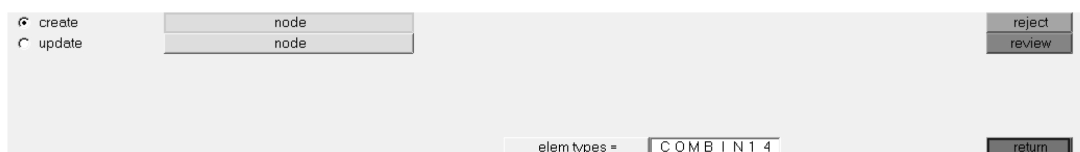


图 3-22　springs 面板

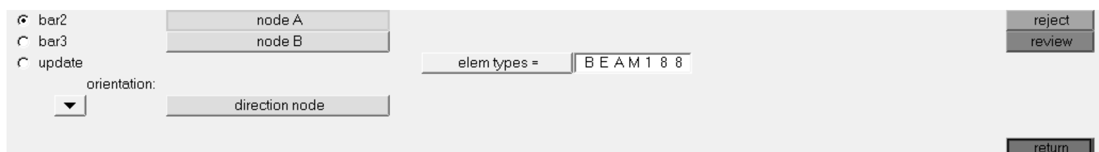


图 3-23　bars 面板

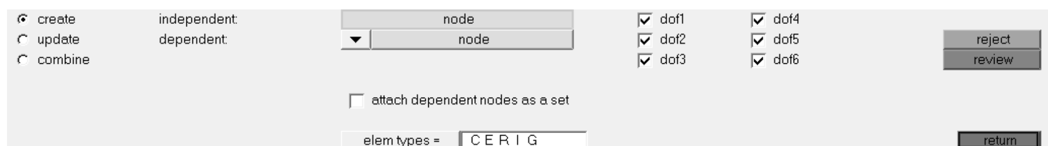


图 3-24　rigids 面板

特别的，对于梁单元 BEAM188，除 1D 页面的 bars 面板（见图 3-23）外，还可以利用 1D 页面的 line mesh 面板（见图 3-26）进行网格划分，并且提供了梁截面工具 HyperBeam。由于 ANSYS 求解器的特殊性，创建梁单元时必须特殊考虑。第 6.7 节给出了利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建梁单元的实例，介绍了利用 1D 页面的 bars 面板和 line mesh 面板创建梁单元的具体过程和注意事项。



图 3-25　rbe3 面板

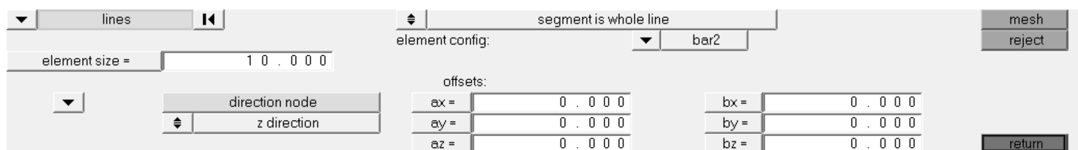


图 3-26 line mesh 面板

3.4 二维网格划分实例

二维网格是有限元模型的基础。二维网格可以分布于体的表面用于生成三维网格，三维网格的质量将取决于二维网格的质量。HyperMesh 定义的二维单元通常是指面单元。对于 ANSYS，面单元可表示 TARGE170、CONTA173、CONTA174、SHELL181 和 SHELL281 等。

HyperMesh 提供了丰富的工具（位于 2D 页面，见图 3-6），可以实现任意复杂程度曲面二维网格的划分。HyperMesh 提供了一个重要的二维网格划分工具 automesh（见图 3-27），它提供了尽可能多的自动功能。用户可以交互调整大量的参数和选择算法，HyperMesh 可以实时显示参数改变带来的变化，直到网格满足分析要求。



图 3-27 automesh 面板

用户可以利用 automesh 面板控制边线上单元和节点的数量；通过偏置节点使一端的单元分布密集，而另一端分布稀疏，并立即观察到节点的布置位置；可以指定单元类型为三角形、四边形或混合型，选用一阶单元或二阶单元；在将单元保存至数据库之前，可以预览生成的单元，检查单元质量；在网格划分过程中，可以利用工具栏中的模型显示工具来观察复杂模型。下面通过实例介绍如何利用 HyperMesh 进行二维网格划分。

STEP 1 打开模型文件

1）启动 HyperMesh，并选择 ANSYS 模板。

2）单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\下找到 channel.hm 文件并打开，模型如图 3-28 所示。

STEP 2 一次性为所有的面划分单元

1）按快捷键〈F12〉，进入 automesh 面板。

2）选择 size and bias 子面板。

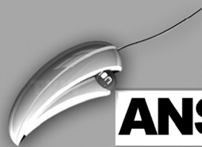
3）单击 surfs 按钮，在弹出的选项中选择 displayed。

4）设置 element size 为 5。

5）设置 mesh type 为 mixed，即四边形和三角形混合模式。

6）在面板左下方，选择 interactive 作为激活的网格划分模式。

7）确认激活 elems to surf comp，将生成的单元放置于原几何组件集中。



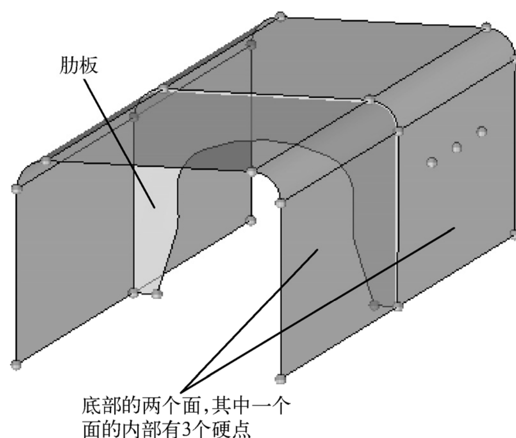


图 3-28　channel.hm 模型

8）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块。注意，此时处于网格划分模块的 density 子面板，节点的位置和数目已标示在曲面的边界上，边上的数字表示在这条边上生成的单元数目，如图 3-29 所示。

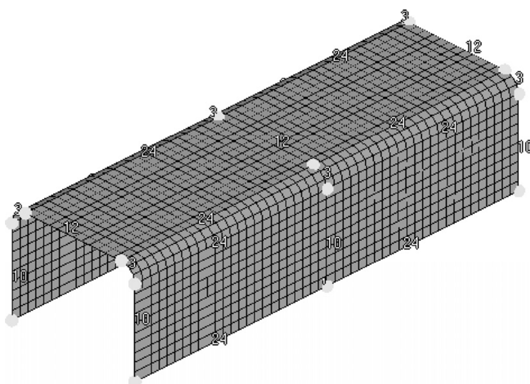


图 3-29　一次性为所有的面划分单元

9）单击 return 按钮，返回 automesh 面板，接受所划分的网格。

此时已经完成网格划分，而且网格具有较好的质量。以下将学习如何使用不同的子面板对生成的曲面网格进行交互式控制。

STEP③ 删除网格

1）按快捷键〈F2〉，进入 delete 面板。

2）将对象选择器切换为 elems。

3）单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 all，即选中所有单元。

4）单击 delete entity 按钮，删除所有单元。

5）单击 return 按钮，返回 automesh 面板。

STEP④ 对内部有 3 个硬点的表面进行网格划分

1）此时仍在 automesh 面板，size and bias 子面板。

2）保持面板菜单的所有设置不变。

3）激活 surfs 选择器，选择内部有 3 个硬点的表面，如图 3-30 所示。

4）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块。

5）预览生成的网格。

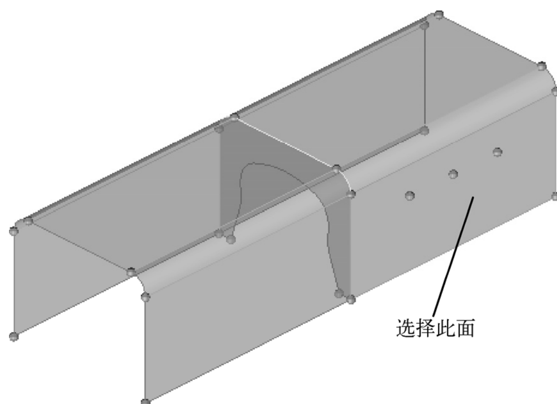


图 3-30　选择内部有 3 个硬点的表面

STEP 5 在图形区沿表面边界设定新的单元密度

1）在 density 子面板中，单击 f 按钮，将被划分网格的表面满屏显示。

2）单击选择器 adjust: edge，使其处于激活状态。

3）在图形区，用鼠标左键单击任意一条边上的单元密度数值，该数值将增加 1。

4）用鼠标右键单击该边上的单元密度数值，该数值将减少 1。

5）按住鼠标左键不放，同时将鼠标向上或向下拖动，可增加或减少单元密度，如图 3-31 所示。

6）单击 mesh 按钮，更新网格，如图 3-32 所示。

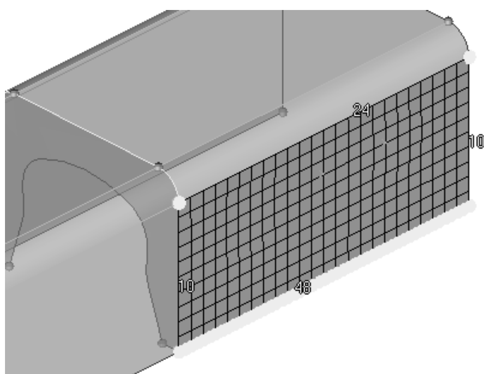


图 3-31　将单元密度由 24 增加到 48

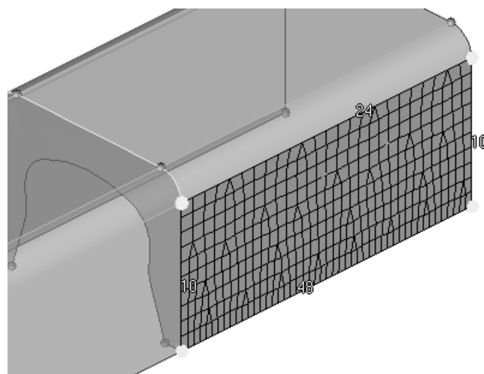


图 3-32　更新网格

STEP 6 通过面板菜单沿表面边界设定新的单元密度

1）在 density 子面板中，设置 elem density 为 10。

2）激活选择器 set: edge。

3）单击边上的数值，该边上的数值变为 10，如图 3-33 所示。

4）单击 mesh 按钮，更新网格。

5）单击 set all to 按钮，将所有边上的单元密度改为 10，如图 3-34 所示。

6）单击 mesh 按钮，更新网格。

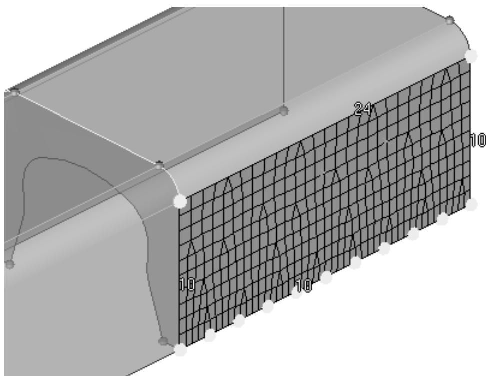


图 3-33　将该边的单元密度改为 10

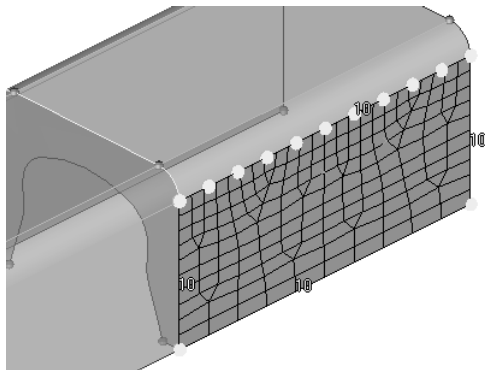


图 3-34　将所有边的单元密度改为 10

STEP 7 通过面板菜单沿表面边界设定新的单元尺寸并调整单元密度

1）在 density 子面板中，将 elem size 设置为 7。

2）激活选择器 calculate: edge。

3）单击任意一条边上的单元密度数值，系统基于单元大小值 7 重新计算生成新的单元密度数值，如图 3-35 所示。

4）单击 mesh 按钮，更新网格。

5）单击 recalc all 按钮，设置所有边上的单元尺寸为 7，如图 3-36 所示。

6）单击 mesh 按钮，更新网格。

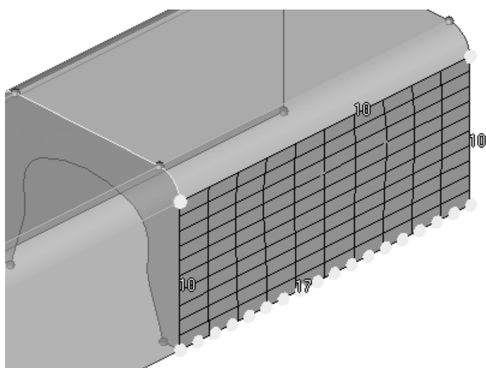


图 3-35　将该边的单元尺寸改为 7

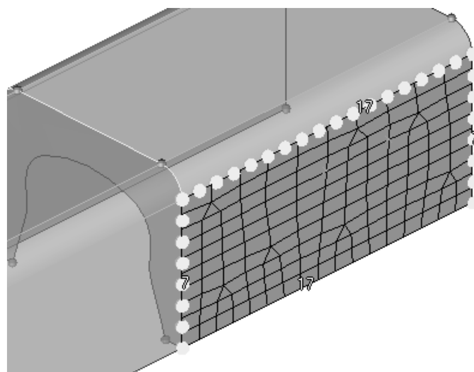


图 3-36　将所有边的单元尺寸改为 7

STEP 8 将所有边的单元尺寸改为初始值 5

1）将 elem size 设置为 5。

2）单击 recalc all 按钮。

3）单击 mesh 按钮，更新网格。

4）单击 return 按钮，接受生成的网格，并返回 automesh 子面板。

STEP 9 预览肋板的网格

1）激活 surfs 选择器，选择肋板面。

2）保持当前面板菜单的设置不变。

3）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块，预览生成的网格。

4）单击 local view 按钮，在弹出的选项中选择 rear 视图，肋板网格模型将满屏显示，如图 3-37 所示。

STEP 10 检查肋板网格质量

1）选择 checks 子面板。

2）单击 aspect 按钮，检查是否有纵横比超过 5 的单元。状态栏提示了单元的最大纵横比为 1.56，所有单元都满足检查指标要求。

3）将 jacobian 设置为 0.8。

4）单击 jacobian 按钮，检查是否有 jacobian 值低于 0.8 的单元。注意有的单元显示为红色，表明这些单元是不满足检查指标要求的，并且状态栏提示最小 jacobian 值为 0.74，如图 3-38 所示。

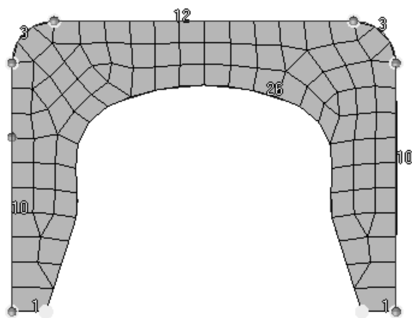


图 3-37 肋板网格模型

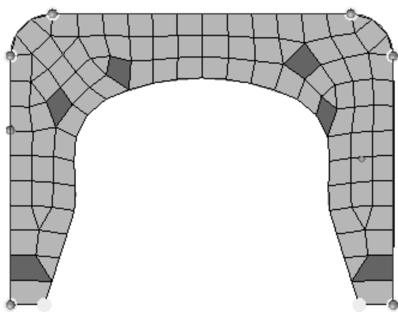


图 3-38 检查 jacobian 值

5）将 jacobian 设置为 0.7。

6）单击 jacobian 按钮，检查是否有 jacobian 值低于 0.7 的单元。状态栏提示最小 jacobian 值为 0.74，所有单元都满足检查指标要求。

7）单击 quads 下面的 min angle 按钮，检查是否有内角小于 45° 的四边形单元。状态栏提示最小内角为 46.46°，所有单元都满足检查指标要求。

8）单击 quads 下面的 max angle 按钮，检查是否有内角大于 135° 的四边形单元。注意图形区有一个单元呈红色显示，表明这个单元不满足检查指标要求，并且状态栏提示最大内角为 136.58°。

STEP 11 改变网格划分算法以改变肋板的网格模型

1）选择 mesh style 子面板。

2）注意肋板的表面上有一个蓝色图标，它表示当前使用的是 free（unmapped）网格划分算法，如图 3-39 所示。

3）在 mesh method 下面，将 autodecide 切换为 map as rectangle。

4）在 mesh method 下面，单击 set all 按钮。

5）注意蓝色图标的改变（见图 3-40），说明采用了新的网格划分算法。

6）单击 mesh 按钮，更新网格。

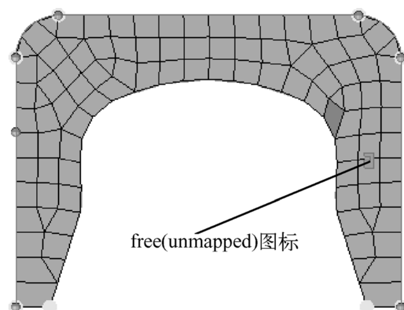


图 3-39 网格划分算法为 free（unmapped）

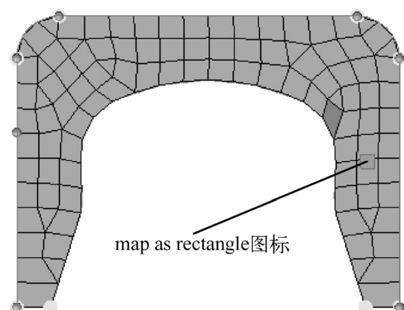


图 3-40 网格划分算法为 map as rectangle

STEP 12 再次检查肋板网格质量

1）选择 checks 子面板。

2）单击 aspect 按钮，检查是否有纵横比超过 5 的单元。

3）单击 jacobian 按钮，检查是否有 jacobian 值低于 0.7 的单元。

4）单击 quads 下面的 min angle 按钮，检查是否有内角小于 45° 的四边形单元。

5）单击 quads 下面的 max angle 按钮，检查是否有内角大于 135° 的四边形单元。

注意：在这个例子中，由 free（unmapped）算法划分的网格要优于由 map as rectangle 算法划分的网格。

STEP 13 将肋板的网格算法改为 free（unmapped）

1）选择 mesh style 子面板。

2）在 mesh method 下面，将 map as rectangle 切换为 free（unmapped）。

3）在 mesh method 下面，单击 set all 按钮。

4）单击 mesh 按钮，更新网格。

5）单击 return 按钮，接受当前网格，返回 automesh 面板。

STEP 14 预览所有显示的网格及没有划分网格的表面

1）单击 Isometric View 按钮，调整显示视角。

2）保持 size and bias 子面板的所有设置不变。

3）单击面板右下方的 failed 按钮，状态栏提示“There are no surfaces with meshing errors”。表明到目前为止所选择的曲面都已划分好了网格。

4）单击 unmeshed 按钮，标示并选择所有未划分网格的曲面。

5）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块，预览生成的网格，如图 3-41 所示。

STEP 15 将一些表面的单元类型改为三角形

1）进入 mesh style 子面板。

2）在 elem type 下面，单击 toggle surf 按钮。注意此时每一个曲面的内表面都有蓝色图标，它表示在当前的表面网格上使用的是 mixed 单元类型。

3）在 elem type 下面，选择 trias。

4）在 elem type 下面，单击 set surf 按钮。

5）用鼠标左键单击图 3-42 所示的两个表面上的蓝色按钮，将单元类型设置为三角形。

6）单击 mesh 按钮，更新网格，如图 3-42 所示。

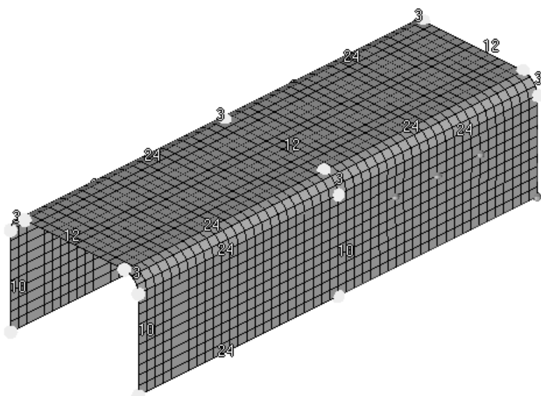


图 3-41　预览生成的网格

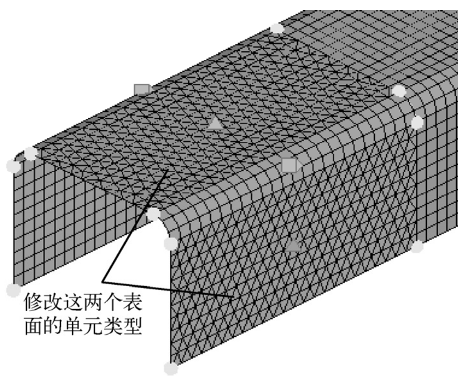


图 3-42　预览生成的三角形网格

STEP 16 在表面边界上调整节点偏置

1）进入 biasing 子面板。注意偏置的数值（默认为 0.000）出现在每一条曲面边上。

2）将 bias style 设置为 linear。这种方式使节点在边上呈线性分布，对于正的偏置值，较小的单元位于边的起始位置。

3）确认选择器 adjust: edge 处于激活状态。

4）用鼠标左键（或右键）单击图 3-43 所示的偏置数值，数值将随之增加（或减小）0.1。

5）在该边上按住鼠标左键不放，并且向上移动鼠标，使数值增加到 3.0。

6）单击 mesh 按钮，预览网格的变化，如图 3-44 所示。

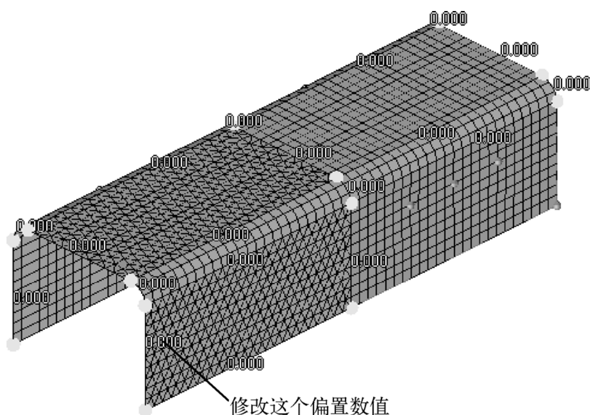


图 3-43　调整节点偏置

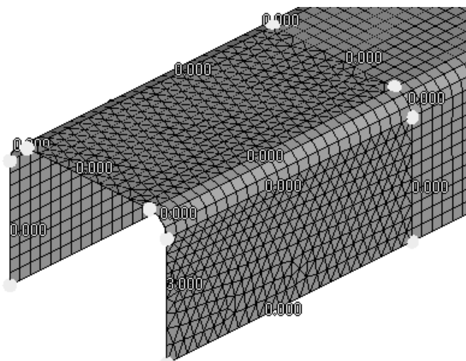


图 3-44　带偏置的网格

7）将 intensity 设置为 10。

8）激活 calculate: edge 选择器。

9）单击同一条边，将数值改为 10。

10）单击 mesh 按钮，预览网格的变化。

11）将 bias style 切换为 bellcurve。这种方式使节点相对于边的中点对称分布，对于正的偏置值，较小的单元位于边的起始和末端位置。

12）激活 set: edge 选择器。

13）单击这条边的蓝色按钮，将它的偏置类型从 linear 改为 bellcurve。

14）单击 mesh 按钮，预览网格的变化。

15）单击 return 按钮，接受生成的网格，并返回 automesh 面板。

STEP 17 对具有三角形单元的面重新划分网格

1）在 size and bias 子面板的左下方，将网格划分模式从 interactive 切换为 automatic。这种模式不是交互式的，它不能进入网格划分模块，仅仅是使用 automesh 面板的基本参数对表面进行了网格划分。

2）激活 surfs 选择器，选择已划分三角形网格的两个面。

3）将 element size 设置为 5。

4）单击 mesh 按钮，删除面上已经存在的网格并重新生成新的网格。

5）检查重新生成的四边形网格，注意在这些网格的外边界保持了连续性，这是因为使用了 keep connectivity 选项（默认选项）。

6）单击 return 按钮，退出 automesh 面板。划分完成的网格与第 2 步一次性划分的网格相同，如图 3-29 所示。

7）如果需要，保存模型，并命名为 channel_completed.hm。

3.5　三维网格划分

空间三维网格的规模比二维网格和一维网格大很多，且网格划分比较困难，技巧性较强。HyperMesh 定义的三维单元通常是指实体单元。对于 ANSYS，实体单元可表示 SOLID185、SOLID186 和 SOLID187 等。

HyperMesh 提供了丰富的工具（位于 3D 页面，见图 3-7），可以对满足条件的几何体直接进行四面体网格的自动划分。HyperMesh 还提供了专业的工具，用于交互控制完成六面体单元的网格划分，如 spin、drag、elem offset、line drag、linear solid、solid map 和 solid mesh。这些先进的实体网格划分工具特点鲜明，针对性强，使 HyperMesh 成为业界公认的杰出的前处理软件。

3.5.1 四面体网格划分实例

HyperMesh 提供了两种四面体网格划分方法，即 Tetra mesh 和 Volume tetra，它们都位于 tetramesh 面板（见图 3-45）。Tetra mesh 需要以三角形或四边形单元的二维网格作为输入，然后提供一系列选项控制四面体网格划分的结果。这种方法提供了大量的控制参数，能够对十分复杂的模型创建高质量的四面体网格。Volume tetra 可以对几何体直接进行四面体网格划分。它通过面或几何实体自动生成四面体网格，用户无需进一步干涉。即使对于较复杂的几何实体，这种方法也能很快且很容易地创建高质量的网格。

tetramesh 面板允许对封闭体进行低阶或高阶四面体网格（基于表面网格的阶次）划分。如果一个区域全部以面单元网格为边界，则可认为该区域是封闭的。下面通过实例介绍如何

利用 HyperMesh 进行四面体网格划分。



图 3-45 tetramesh 面板

STEP 1 打开模型文件

1）启动 HyperMesh，并选择 ANSYS 模板。

2）单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\下找到 housing.hm 文件并打开。模型包含 3 个组件，只有 cover 组件处于显示状态，如图 3-46 所示。housing.hm 模型包含由两个封闭表面定义的部件，已经进行了几何清理，保持表面的连续性，并且压缩了可能产生细小单元的特征边。

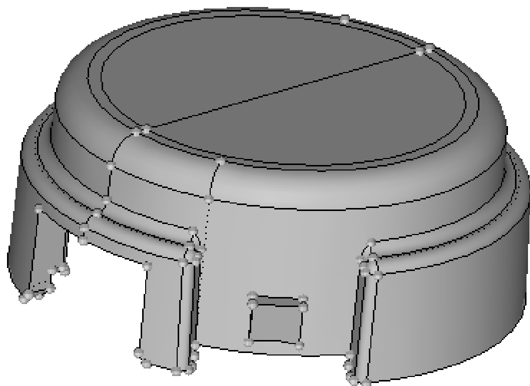


图 3-46 cover 几何模型

STEP 2 调整单元阶次

对于结构分析，第 2.4 节已阐明，4 节点的四面体单元表现出较高的刚度特性，而 10 节点的高阶四面体单元具有很好的计算精度。因此，在划分网格之前，可以先调整单元阶次，以便直接生成高阶单元。

1）按快捷键〈O〉，进入 options 面板。

2）选择 mesh 子面板，将 element order 由 first 切换为 second，即采用二阶单元划分网格。

3）单击 return 按钮，退出 options 面板。

STEP 3 使用 Volume tetra 和等边三角形划分四面体网格

1）在 3D 页面中，选择 tetramesh 面板。

2）选择 Volume tetra 子面板。

3）将选择器由 solids 切换为 surfs，然后选择模型的任一表面，相连的表面将自动被选中。

4）确认 2D type 为 trias，3D type 为 tetras。这些设置用于控制零件的表面网格和实体网格的单元类型。

5）选择 Elems to Current Comp，将生成的单元放置于当前组件 cover。

6）确认没有选中 Use curvature 和 Use proximity 选项。

7）将 Element size 设置为 10。

8）单击 mesh 按钮，创建四面体网格。由于第 2 步将单元设置为高阶选项，这里创建的网格为 10 节点四面体网格。

9）在工具栏中，单击 Shaded Elements and Mesh Lines 按钮，将网格着色显示，如图 3-47 所示。

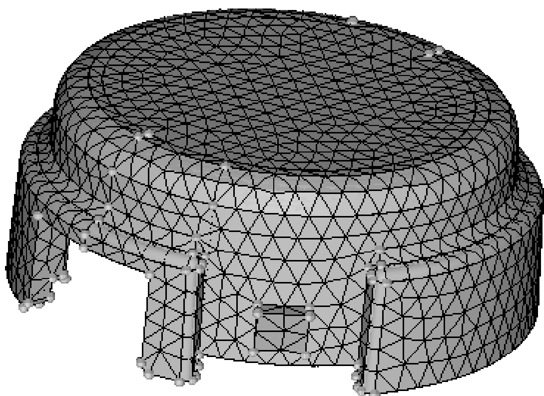


图 3-47　利用 Volume tetra 子面板和 2D: trias 得到的四面体网格

10）单击 reject 按钮，删除网格。

STEP 4 使用 Volume tetra 和直角三角形划分四面体网格

1）此时仍在 Volume tetra 子面板，且模型表面处于选中状态。

2）将 2D type 切换为 R-trias。

3）单击 mesh 按钮，创建四面体网格。

4）查看创建的网格，如图 3-48 所示。与第一次划分的网格（见图 3-47）进行比较，使用 2D: R-trias 时，倾向于创建等腰直角三角形的四面体单元；而使用 2D: trias 时，倾向于创建等边三角形的四面体单元。

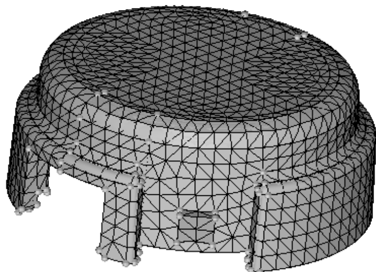


图 3-48　利用 Volume tetra 子面板和 2D: R-trias 得到的四面体网格

5）单击 reject 按钮，删除网格。

STEP 5 使用 Volume tetra 沿曲面创建更加细密的四面体网格

1）此时仍在 Volume tetra 子面板，且模型表面处于选中状态。

2）激活 Use curvature 选项，出现附加选项。Use curvature 选项能够在曲面曲率较大的区域创建更多的单元。因此，像圆角这样的曲率区域会出现更多细小的单元，该选项能够更好地捕捉这些细节特征。

3）将 Min elem size 设置为 1。

4）确认 Feature angle 为 30。

5）单击 mesh 按钮，创建四面体网格。

6）查看创建的网格，如图 3-49 所示。与上一步划分的网格（见图 3-48）进行比较，可以看到在圆角附近的区域创建了更多更细小的单元。

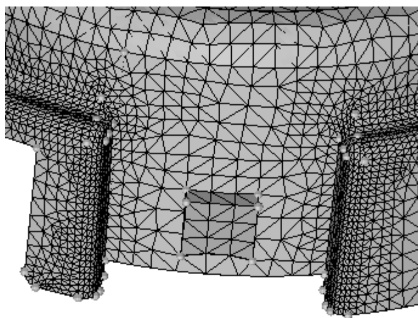


图 3-49 利用 Volume tetra 子面板和 Use curvature 选项得到的四面体网格

7）单击 reject 按钮，删除网格。

STEP 6 使用 Volume tetra 在小特征区域创建更加细密的四面体网格

1）此时仍在 Volume tetra 子面板，且模型表面处于选中状态。

2）激活 Use proximity 选项。Use proximity 选项能够对小曲面区域内的网格进行加密，这样能够从小曲面上的较小单元很好地过渡到相邻大表面上的较大单元。

3）单击 mesh 按钮，创建四面体网格。

4）查看创建的网格，如图 3-50 所示。与上一步划分的网格（见图 3-49）进行比较，可以看到在小角的附近区域创建了更多更细小的单元。

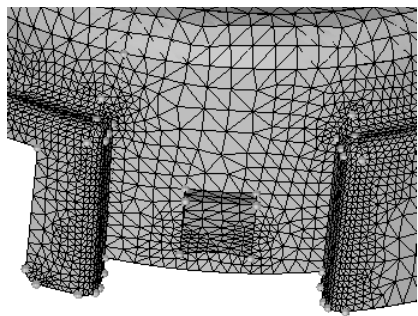


图 3-50 利用 Volume tetra 子面板和 Use proximity 选项得到的四面体网格

5）单击 return 按钮，接受所划分的网格，并退出 tetramesh 面板。

STEP 7 使用 Tetra mesh 划分四面体网格的前期准备

1）在 Model 浏览器中，关闭 cover 组件的几何显示和单元显示。

2）开启 hub 和 tetra 组件的单元显示。此时显示的是 hub 组件中的三角形表面单元，而 tetra 组件中没有四面体单元。

STEP 8 检查三角形表面单元的连续性及单元质量

1）在 Tool 页面中，选择 edges 面板。

2）激活选择器 comps，选择 hub 中的任意一个三角形单元，hub 组件中的所有单元自动被选中。

3）单击 find edges 按钮，状态栏给出提示信息“No edges were found. Selected elements may enclose a volume”。这说明三角形单元形成的区域是封闭的，可以创建四面体网格。

4）单击 return 按钮，退出 edges 面板。

5）在 Tool 页面中，选择 check elems 面板。

6）确认位于 2-d 子面板。

7）单击 aspect 按钮，检查是否有纵横比超过 5 的单元。纵横比是指单元最长边与最短边之比，这项检查用于识别狭长单元。状态栏提示单元的最大纵横比为 2.35，所有单元都满足检查指标要求。

8）单击 trias 下面的 min angle 按钮，检查是否有内角小于 20° 的三角形单元。该项检查也用于识别狭长单元。状态栏提示最小内角为 27.71°，所有单元都满足检查指标要求，表明网格适合于创建四面体单元。

9）单击 return 按钮，退出 check elems 面板。

STEP 9 利用 Tetra mesh 对 hub 划分四面体网格

1）在 Model 浏览器中，右键单击 tetras，并选择 Make Current，将 tetras 组件设为当前组件。

2）在 3D 页面中，选择 tetramesh 面板。

3）选择 tetra mesh 子面板。

4）激活 Float trias/quads to tetra mesh 下面的选择器 comps，并将 remesh 切换为 swap only，然后在图形区选择 hub 组件的任意一个三角形单元，hub 组件中的所有单元自动被选中。

Float trias/quads to tetra mesh 表示构成四面体网格的表面单元是可以改变的，swap only 选项允许任意一对相邻三角形改变对角线取向进行重新划分，从而提高四面体网格质量。如果不想改变已经存在的表面网格，应使用 Fixed trias/quads to tetra mesh 下面的设置。

5）单击 mesh 按钮，创建四面体网格。生成的四面体网格放置于当前组件 tetras，其剖面如图 3-51 所示。

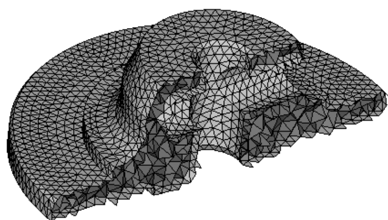


图 3-51　四面体单元的剖面图



6）单击 return 按钮，接受所划分的网格，并退出 tetramesh 面板。

STEP 10 检查 tetras 组件的四面体单元质量

1）在 Tool 页面中，选择 check elems 面板。

2）选择 3-d 子面板。

3）单击 length<按钮，检查单元的最小边长。

4）单击 length >按钮，检查单元的最大边长。

5）单击 tria faces 下面的 min angle 按钮，检查单元的最小内角。

6）将 tet collapse 设置为 0.3，再单击 tet collapse 按钮，检查四面体单元的坍塌程度。状态栏提示有 3 个单元的 tet collapse 值小于 0.3。

tet collapse 是一个标准化的四面体单元检查指标，数值 1 表明是具有最大体积的理想单元，数值 0 则表明是一个完全坍塌的 0 体积单元。关于单元质量检查的详细内容，详见第 3.7 节。

STEP 11 隔离 tet collapse 值小于 0.3 的单元

1）单击 save failed 按钮，未通过 tet collapse 检查指标的 3 个单元将被保存，它们可以在任何面板中使用扩展菜单中的 retrieve 选项读取。

2）单击 return 按钮，退出 check elems 面板。

3）按快捷键〈F5〉，进入 mask 面板。

4）确认对象选择器为 elems，单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 retrieve。在 check elems 面板中保存的 3 个单元被读取。

5）单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 reverse。

6）单击 mask 按钮，只有 tet collapse 值小于 0.3 的 3 个单元处于显示状态。

7）单击 return 按钮，退出 mask 面板。

8）在显示工具栏中，单击 Unmask Adjacent Elements 按钮，与当前单元相邻的单元被识别并显示出来。

9）继续单击 Unmask Adjacent Elements 按钮两次，更多附近的单元被识别并显示出来。

STEP 12 重新划分当前显示的四面体单元

1）在 3D 页面中，选择 tetramesh 面板。

2）选择 Tetra remesh 子面板。

3）在 3D elements 下面，单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 displayed。

4）单击 remesh 按钮，对当前显示的单元重新划分网格。

5）单击 return 按钮，退出 tetramesh 面板。

6）在 Tool 页面中，选择 check elems 面板。

7）单击 tet collapse 按钮，检查 tet collapse 值是否提高。

对于不同版本的 HyperMesh，可能得到不同质量的四面体网格。一般来说，采用 Tetra remesh 方法可以提高四面体单元的质量。

8）单击 return 按钮，退出 check elems 面板。

9）在 Model 浏览器中，关闭所有组件的单元显示，再开启 cover 和 tetras 组件的单元显示。

10）如果需要，保存模型，并命名为 housing_completed.hm。

至此，housing.hm 模型中的两个零件都已经划分了四面体网格。本例采用了两种四面体

网格划分方法，并且演示了利用 tetra remesh 工具快速提高网格质量的方法。值得注意的是，tetras 组件中的单元为 4 节点四面体单元，通过 1D/2D/3D 页面的 order change 面板可以将它们转换为 10 节点四面体单元，以满足结构分析的需要。

3.5.2 六面体网格划分实例

尽管 HyperMesh 可以自动完成四面体网格的划分，但由于六面体网格收敛性好、计算精度高，大量的实体模型仍须采用六面体单元进行划分。

HyperMesh 创建六面体网格的基本思想是，对已有的二维网格经过投影、比例缩放、拉伸、扫掠等方法生成三维实体单元。HyperMesh 提供的生成六面体单元的工具有 spin、drag、elem offset、line drag、linear solid、solid map 和 solid mesh。下面通过实例介绍如何利用 HyperMesh 进行六面体网格划分。

STEP 1 打开模型文件

1）启动 HyperMesh，并选择 ANSYS 模板。

2）单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\下找到 arm_bracket.hm 文件并打开。模型由 4 部分组成，分别是：基座 base、等截面等曲率的支臂 arm_curve、锥形截面的支臂 arm_straight 和凸台 boss，如图 3-52 所示。

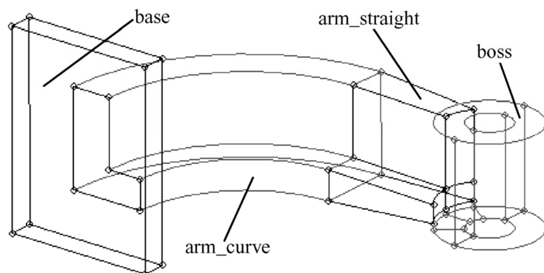


图 3-52 arm_bracket.hm 模型

STEP 2 对基座的顶部划分四边形网格

1）在 Model 浏览器中，右键单击 base，并选择 Isolate Only，仅显示 base 组件。

2）按快捷键〈F12〉，进入 automesh 面板。

3）选择 size and bias 子面板。

4）选择基座的上表面（包括处于基座和支臂相交处的 L 形表面）。

5）将 element size 设置为 10。

6）将 mesh type 设置为 quads only。

7）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块。

8）单击 return 按钮，接受所划分的网格（见图 3-53），返回 automesh 面板。

9）单击 return 按钮，退出 automesh 面板。

STEP 3 创建基座的六面体单元

1）在 3D 页面中，选择 elem offset 面板。

2）选择 solid layers 子面板。

3）在 elems to offset 下面，单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 displayed。

4）将 number of layers 设置为 5。

5）将 total thickness 设置为 25。

6）单击 offset+按钮，创建六面体网格，如图 3-54 所示。

7）单击 return 按钮，退出 elem offset 面板。

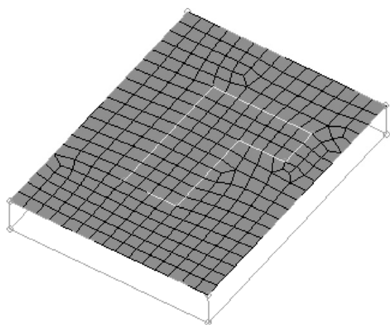


图 3-53 基座表面的四边形网格

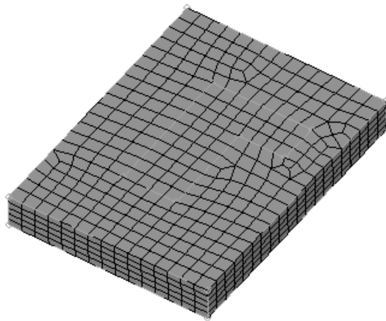


图 3-54 基座的六面体单元

STEP 4 为 arm_curve 的网格划分做好显示准备

1）在 Model 浏览器中，开启 arm_curve 组件的几何显示和单元显示。

2）按快捷键〈F5〉，进入 mask 面板。

3）单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by config，弹出新的面板菜单，单击 config=按钮，在弹出的选项中选择 hex8，单击 type=按钮，在弹出的选项中选择 SOLID45，单击 select entities 按钮，选中当前显示的六面体网格。

注意：对于 ANSYS 模板，以 by config 方式选择单元时，必须同时设置 config 和 type 选项才能选中单元。本例中，hex8 表示六面体单元，SOLID45 为默认的六面体单元类型。通过 1D/2D/3D 页面的 elem types 面板可以查看和修改默认的单元类型。

4）单击 mask 按钮，隐藏被选中的六面体单元。

5）单击 return 按钮，退出 mask 面板。

STEP 5 在 arm_curve 的曲率中心创建一个节点

arm_curve 可以用 spin 面板划分网格，这需要选定一个节点作为旋转中心，在这一步创建的节点将作为旋转中心。

1）按快捷键〈F4〉，进入 distance 面板。

2）选择 three nodes 子面板，N1 按钮被激活。

3）在 arm_curve 的任意一条曲线上，按住鼠标左键并拖动。一旦光标变成中心带点的方形▣，此曲线高亮显示，释放鼠标左键。

4）沿着所选线选定 3 处位置，N1、N2、N3 依次自动激活，就像有节点一样，3 个位置被选中。

5）单击 circle center 按钮，通过三个节点在曲率中心创建一个临时节点，如图 3-55 所示。

6）单击 return 按钮，退出 distance 面板。

STEP 6 利用 spin 面板为 arm_curve 创建六面体单元

1）在 Model 浏览器中，将 arm_curve 设置为当前组件。

2）在 3D 页面中，选择 spin 面板。

3）选择 spin elems 子面板。

4）单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by geoms，弹出新的面板菜单，激活 surfs 选择器，并选择 L 形截面，单击 add to selection 按钮，选中 L 形截面内的面单元，如图 3-56 所示。

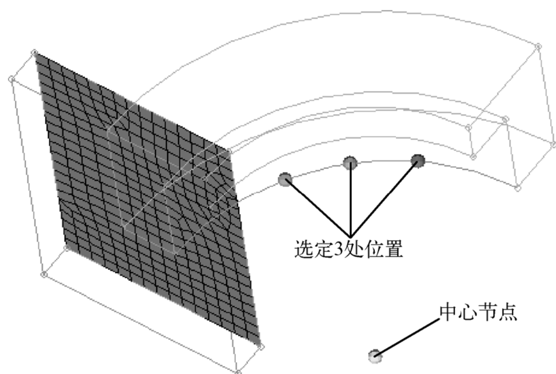
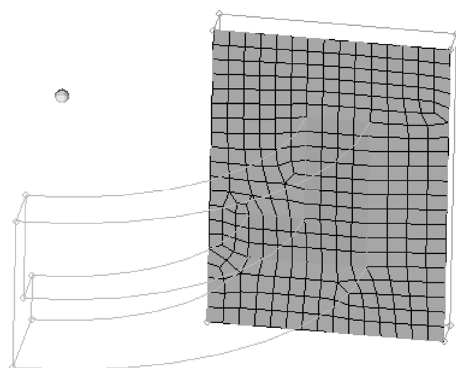


图 3-55 利用 3 个节点找到曲率中心


图 3-56 选中 L 形截面内的面单元

5）将 angle 设置为 90，表示旋转 90°的范围。

6）将 on spin 设置为 24，表示当面单元旋转时，沿路径创建 24 层六面体单元。

7）将方向选择器切换为 x-axis，并选择之前创建的中心节点作为旋转中心。

8）单击 spin-按钮，创建六面体单元，如图 3-57 所示。

9）单击 return 按钮，退出 spin 面板。

STEP 7 在六面体单元的表面创建面单元

1）在 Tool 页面中，选择 faces 面板。

2）激活选择器 comps，并选择 arm_curve 组件。

3）单击 find faces 按钮，在 arm_curve 组件的六面体单元的自由面上创建表面单元，并存放在一个名为^faces 的新组件中。

4）单击 return 按钮，退出 faces 面板。

STEP 8 为 arm_straight 的网格划分做好显示准备

1）在 Model 浏览器中，关闭 base 和 arm_curve 组件的几何显示和单元显示。

2）开启 arm_straight 组件的几何显示和单元显示。此时，只有 arm_straight 和^faces 组件的几何和单元处于显示状态。

STEP 9 对 arm_straight 和 boss 之间的 L 形曲面划分网格

1）在 Model 浏览器中，设置 arm_straight 为当前组件。

2）按快捷键〈F12〉，进入 automesh 面板。

3）选择位于 arm_straight 和 boss 相交处的 3 个表面，这些表面在 arm_straight 组件中。

4）将网格划分模式设置为 interactive。

5）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块。

6）在 density 子面板中，调整单元密度，获得如图 3-58 所示的网格。这一网格模式与两段支臂相交处的网格模式相匹配，这样才能进行下一步的操作。

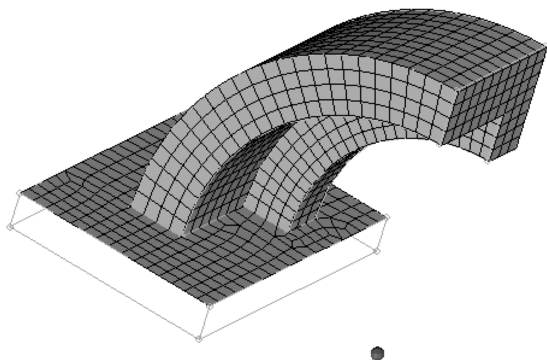


图 3-57 利用 spin 面板创建的六面体单元

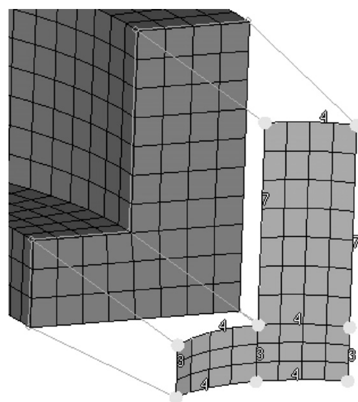


图 3-58 端面的网格密度

7）单击 mesh 按钮，更新网格。

8）单击 return 按钮，接受所划分的单元，并返回 automesh 面板。

9）单击 return 按钮，退出 automesh 面板。

STEP 10 利用 linear solid 面板为 arm_straight 创建六面体单元

1）在 3D 页面中，选择 linear solid 面板。

2）激活 from 下面的 elems 选择器，选择^faces 组件中位于两段支臂相交处的单元。可以先选择这些单元中的一个，然后单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by face，再选择其余所需单元。

3）激活 to 下面的 elems 选择器，选择上一步中用 automesh 面板创建的面单元。

4）激活 from: alignment: N1，按顺时针选择图 3-59 所示的 3 个节点。

5）激活 to: alignment: N1，按顺时针选择图 3-59 所示的 3 个节点，这 3 个节点的位置和顺序应与步骤 4）所选节点相对应。

6）将 density 设置为 12，沿路径创建 12 层六面体单元。

7）单击 solids 按钮，创建六面体网格，如图 3-60 所示。

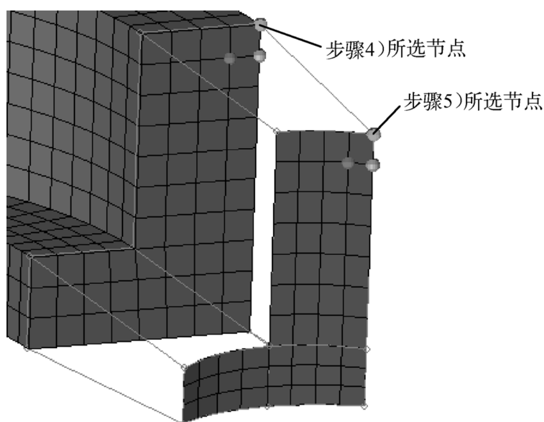


图 3-59 选择方向节点

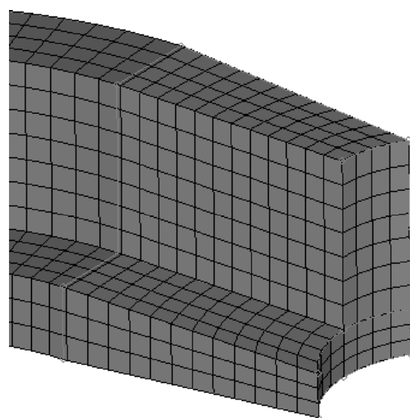


图 3-60 利用 linear solid 面板创建的网格

8）单击 return 按钮，退出 linear solid 面板。

STEP 11 在凸台底面创建面网格

1）在 Model 浏览器中，开启 boss 组件的几何显示和单元显示。

2）设置 boss 为当前组件。

3）按快捷键〈F12〉，进入 automesh 面板。

4）选择凸台底面的 5 个表面。

5）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块。

6）在 density 子面板中，调整单元密度，获得如图 3-61 所示的网格。

7）单击 mesh 按钮，更新网格。

8）单击 return 按钮，接受所划分的单元，并返回 automesh 面板。

9）单击 return 按钮，退出 automesh 面板。

STEP 12 将一个节点投影到凸台顶面

1）在 Tool 页面中，选择 project 面板。

2）选择 to line 子面板。

3）激活 nodes 选择器，选择如图 3-62 所示的节点。

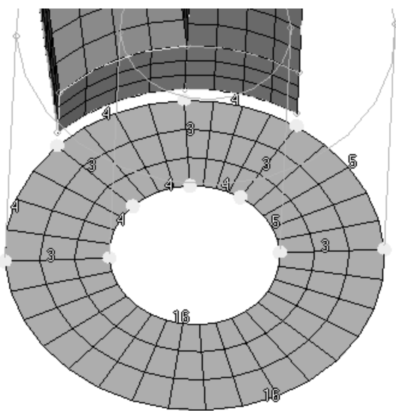


图 3-61 凸台底面的网格密度

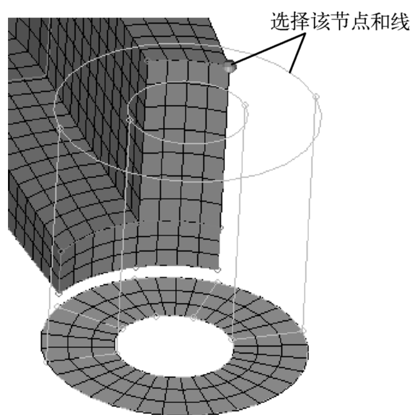


图 3-62 选择节点和线

4）单击 nodes 按钮，在弹出的选项中选择 duplicate。

5）激活 to line 下面的 line list 选择器，选择如图 3-62 所示的线。

6）将 along vector 设置为 x-axis。

7）单击 project 按钮，将节点投影到线上。

8）单击 return 按钮，退出 project 面板。

STEP 13 利用 solid map 面板为凸台创建六面体网格。

1）在 3D 页面中，选择 solid map 面板。

2）选择 general 子面板。

3）将 source geom 设置为（none）。

4）激活 destgeom 下的 surf 选择器，选择凸台的顶面。

5）将 along geom 设置为 mixed。

6）在 along geom: mixed 下面，激活 lines 按钮，选择如图 3-63 所示的线。

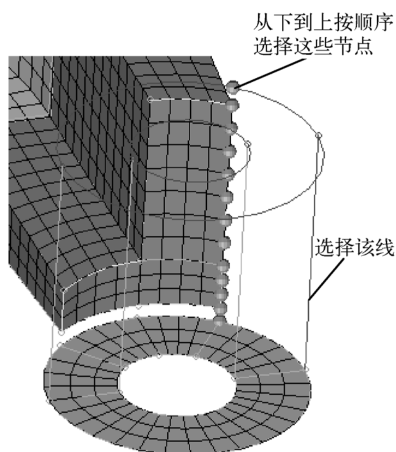


图 3-63　沿节点进行 solid map

7）激活 node path 选择器，选择如图 3-63 所示的 13 个节点。这些节点从凸台的底面开始，沿着 arm_straight 组件的边缘的所有节点，至投影到凸台顶部的节点结束。

8）激活 elems to drag 下面的 elems 选择器。单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by collector，弹出新的面板菜单，勾选 boss 组件，单击 select 按钮，选中凸台底部的面单元。

9）单击 mesh 按钮，创建六面体单元，并放置于新创建的 solidmap 组件，如图 3-64 所示。

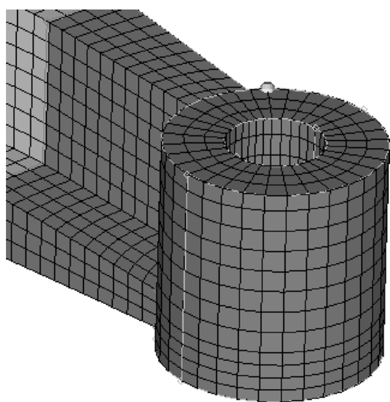


图 3-64　利用 solid map 面板创建的网格

10）单击 return 按钮，退出 solid map 面板。

STEP 14 检查模型的连续性

1）在 Tool 页面中，选择 faces 面板。

2）单击 comps 按钮，勾选所有组件，并单击 select 按钮。

3）单击 find faces 按钮。

4）在 Model 浏览器中，只开启^faces 组件的单元显示，关闭其余组件的几何显示和单元显示。

5）单击 return 按钮，退出 faces 面板。

6）在 Post 页面中，选择 hidden line 面板。

7）激活 xz plane 和 trim planes 选项。

8）单击 xzplane 栏中的 reverse 按钮。

9）单击 show plot 按钮。通过模型中间的切面，可以观察模型内部。

10）单击切面附近的区域，按下鼠标左键，并前后拖动鼠标，带动切面在模型中移动，可以观察模型内部是否有面单元存在。

注意：在凸台与支臂之间的模型内部有面单元（见图 3-65），因此需要对模型的连续性进行修正。

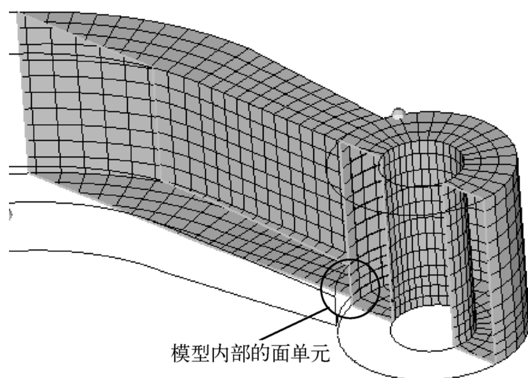


图 3-65　面的隐藏线视图

11）单击 return 按钮，退出 hidden line 面板。

STEP 15 修正模型的连续性

1）在 Model 浏览器中，关闭^faces 组件的单元显示，开启其余组件的单元显示。

2）在 Tool 页面中，选择 faces 面板。

3）将选择器由 comps 切换为 elems，单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 displayed。

4）将 tolerance 设置为 1。

5）单击 preview equiv 按钮，查找重复节点，状态栏提示找到 60 个重复节点。

6）单击 equivalence 按钮，合并重复节点。

7）单击 delete faces 按钮，删除^faces 组件及内部的单元。

8）单击 return 按钮，退出 faces 面板。

STEP 16 删除面单元和临时节点

在创建六面体单元的过程中，对部分曲面划分了四边形单元，还生成了两个临时节点。此时需要删除这些单元和节点，仅保留六面体单元。

1）按快捷键〈F2〉，进入 delete 面板。

2）激活 elems 选择器，单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by config，弹出新的面板菜单，单击 config=按钮，在弹出的选项中选择 quad4，单击 type=按钮，在弹出的选项中选择 SHELL63，单击 select entities 按钮，选中当前显示的四边形网格。

注意：对于 ANSYS 模板，以 by config 方式选择单元时，必须同时设置 config 和 type 选项才能选中单元。对于本例，quad4 表示四边形网格，SHELL63 为默认的四边形单元类型。

通过 1D/2D/3D 页面的 elem types 面板可以查看和修改默认的单元类型。

3）单击 delete entity 按钮，删除选中的四边形网格。

4）单击 return 按钮，退出 delete 面板。

5）在 Geom 页面中，选择 temp nodes 面板。

6）单击 clear all 按钮，清除临时节点。

7）单击 return 按钮，退出 temp nodes 面板。

8）如果需要，保存模型，命名为 arm_bracket_completed.hm。

至此，arm_bracket.hm 模型的网格划分已经完成。根据实际需要，本例采用了多种六面体网格划分的方法。建立完模型之后，还要注意检查和修正单元的连续性。

3.6 网格质量检查

3.6.1 网格质量检查内容

网格质量是指网格形状的合理性。当各类网格具有理想的形状时，计算结果最好。实际划分的网格不可能都达到理想形状，这就是网格变形。当网格变形超出一定限度时，计算精度会随变形的增加而显著下降。因此，在划分网格时，应将网格变形控制在一定范围内，也就是说，网格应该满足一定的质量要求。

对于简单的模型，使用自动或半自动方法划分的网格可以不经过网格质量检查而直接用于分析。但对于复杂的模型，由于结构形状和网格生成的复杂性，网格或多或少存在一些质量问题。单元的网格质量直接关系到有限元模型分析的精度和收敛性，因此，网格质量检查是网格划分过程中必不可少的一步，也是有限元分析中必须引起重视的一步。建议将网格质量检查与网格划分同时进行，尤其对于复杂构件，应避免网格全部划分完成后的一次性检查，这会导致出现大量失效网格而造成单元质量改进工作的巨大困难。

网格质量检查包括单元连续性检查、单元法向检查、重复单元检查以及单元各项质量检查等内容。HyperMesh 提供了多个工具用于单元质量检查以及单元质量修正[10-12]，分别介绍如下。

（1）qualityindex 面板

qualityindex 面板位于 2D 页面，用于评估二维网格的整体质量，如图 3-66 所示。在 qualityindex 面板中，可以设置质量检查标准，并按这些标准用一个值——综合质量指标值（comp. QI）评价网格的质量。同时，该面板也提供了编辑和优化节点/单元的工具 cleanup tools。

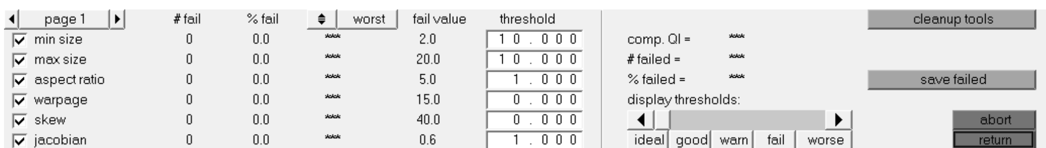


图 3-66 qualityindex 面板

（2）edges 面板

edges 面板位于 Tool 页面，也可通过快捷键〈Shift + F3〉进入 edges 面板，如图 3-67 所

示。edges 面板可以在二维单元中查找自由边（不连续的边）、“T”形连接（与三个或更多单元连接的边）或者不连续的连接，同时可以合并重复的节点。在合并重复节点之前，可以利用 preview equiv 预览在使用 equivalence 时将被合并的节点，以判断这些节点是否需要合并，以及给定的容差是否合适。

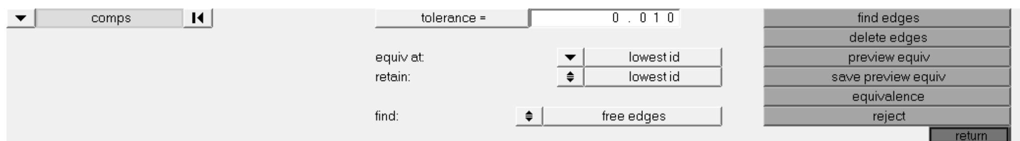


图 3-67　edges 面板

（3）faces 面板

faces 面板位于 Tool 页面，如图 3-68 所示。faces 面板的操作方式与 edges 面板相同，只是针对三维单元。faces 面板可用于生成三维实体单元的表面单元（二维单元），查找三维实体单元的自由面（不连续的面），也可用于查找并删除重复的节点。

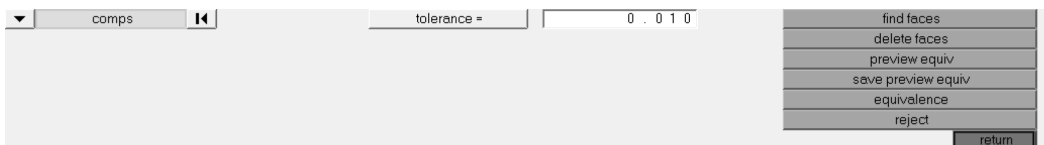


图 3-68　faces 面板

（4）normals 面板

normals 面板位于 Tool 页面，也可通过快捷键〈Shift + F10〉进入 normals 面板，如图 3-69 所示。在某些有限元分析中，如接触分析，要求单元法向必须一致。normals 面板可以显示面或单元的法线，可以调整单元法线方向并且可以将单元或面的法线反向。单元的法线方向是由组成单元的节点按顺序以“右手法则”确定的。

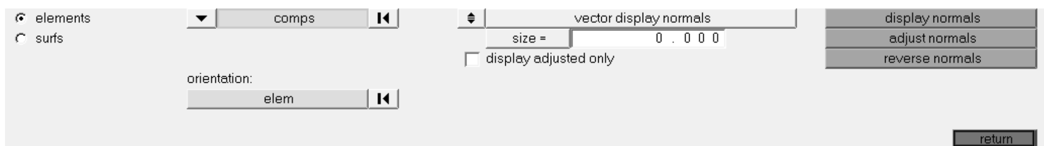


图 3-69　normals 面板

（5）check elems 面板

check elems 面板位于 Tool 页面，也可通过快捷键〈F10〉进入 check elems 面板。check elems 面板可以检查单元的基本质量和几何质量。依据单元类型，check elems 面板可分为三类单元质量检查面板，即 1-d、2-d、3-d 面板，如图 3-70～图 3-72 所示。

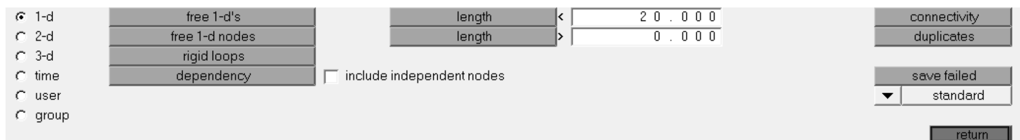


图 3-70　1-d 单元质量检查面板

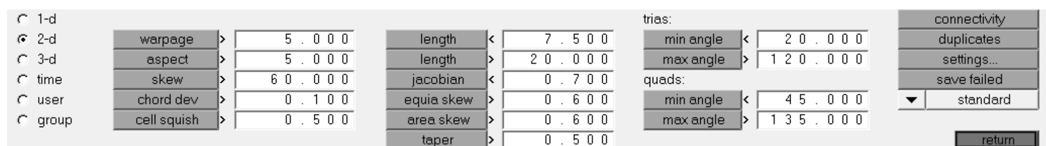


图 3-71　2-d 单元质量检查面板

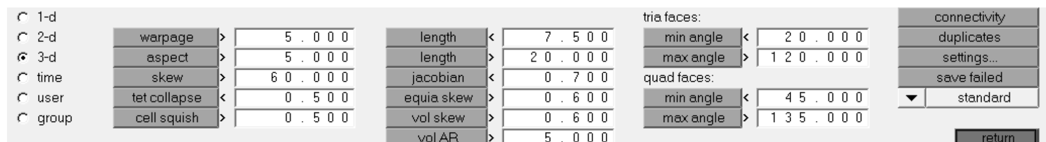


图 3-72　3-d 单元质量检查面板

1）1-d 单元质量检查。1-d 单元质量检查包含以下几方面。

① free 1-d's——检查一维单元是否含有自由端。

② free 1-d nodes——检查一维单元端部的自由节点（未与其余单元连接）。

③ rigid loops——检查一维刚性单元是否形成刚性环。

④ dependency——检查焊接和刚性单元是否含有双重依赖。

⑤ length<——检查单元的最小长度。

⑥ length >——检查单元的最大长度。

2）2-d 单元质量检查。2-d 单元质量检查包含以下几方面。

① warpage——检查四边形单元的翘曲量，即单元偏离平面的量。由于三点形成平面，当四边形的一个角点与其他三个角点不在同一平面上时，则形成翘曲。一般，可接受小于 5 度的翘曲量。

② aspect——检查单元的纵横比，即单元最长边与最短边之比。一般，纵横比应小于 5。

③ skew——检查单元的扭曲度。三角形单元的扭曲角定义为：单元任意一边的中线与其余两边中点连线所成最小夹角的余角，即 $90°-\min(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3)$ 。四边形单元的扭曲角定义为：单元对边中点连线所成最小夹角的余角，即 $90°-\min(\alpha_1,\alpha_2)$ ，如图 3-73 所示。

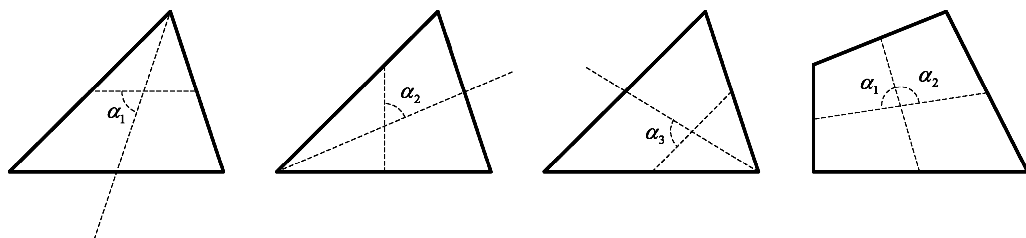


图 3-73　扭曲角的几何表示

④ chard dev——检查表面单元偏离真实曲面的程度，即弦差。曲面可以用许多小的平面来近似，弦差即为单元各边的中点与该点在对应面上的投影点的距离。

⑤ cell squish——检查单元的非正交程度。

⑥ length <——检查单元的最小边长。

⑦ length >——检查单元的最大边长。

⑧ jacobian——检查单元偏离理想形状的程度，即雅可比。jacobian 值的范围为从 0 到 1，1 表示理想形状。HyperMesh 在每个单元的高斯积分点或角节点计算 jacobian 矩阵的行列式，并且输出最小值与最大值之比，即 jacobian 值。通常认为大于 0.7 的比值是可以接受的，而小于 0 的比值表示一个凹面单元，这将导致收敛问题。

⑨ equia skew——检查单元的归一化扭曲度。

⑩ area skew——检查单元与理想单元的偏差程度。

⑪ taper——检查四边形单元偏离矩形的程度。四边形可由对角线分为两个区域，如图 3-74 所示。taper 按式（3-1）定义：

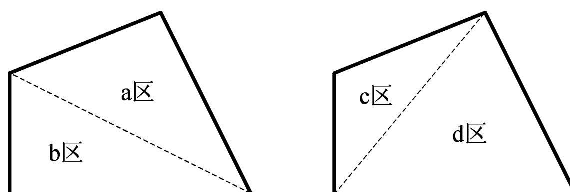


图 3-74　四边形分区

$$taper = 1 - \left(\frac{A_{tri}}{0.5 \times A_{quad}} \right)_{min} \tag{3-1}$$

式中，A_{tri} 为单个三角形区域的面积；A_{quad} 为四边形的面积。

可见，当 taper 接近 0 时，四边形近似为矩形。特别的，规定三角形的 taper 值为 0。

⑫ trias: min angle——检查三角形单元的最小内角。

⑬ trias: max angle——检查三角形单元的最大内角。

⑭ quads: min angle——检查四边形单元的最小内角。

⑮ quads: max angle——检查四边形单元的最大内角。

3）3-d 单元质量检查。3-d 单元质量检查包含了与 2-d 单元质量检查相同的项，如 warpage、aspect、skew、cell squish、length <、length >、jacobian、equia skew、min angle 和 max angle。除此之外，3-d 单元质量检查还包含一些新的检查项，用于三维实体单元质量检查。

① tet collapse——检查四面体单元的坍塌程度。HyperMesh 计算四面体每个顶点到其相对面的距离并除以该面面积的二次根，取其中的最小值除以 1.24，所得即为 tet collapse 值。四面体坍塌时，该值为 0，对于正四面体，该值为 1。

② vol skew——检查四面体单元扭曲的程度。HyperMesh 假定一个过四面体 4 个顶点的球体，再依照球体的半径，算出一个理想的正四面体的体积，定义 vol skew=（理想体积-实际体积）/理想体积。vol skew=0 代表正四面体，vol skew=1 代表完全坍塌的四面体，即体积为 0。

③ vol AR——检查三维实体单元的形状。对于四面体单元，vol AR 为最长的边与最小高线之比；对于其余三维实体单元，vol AR 为最长的边与最短的边长之比。

3.6.2 网格质量检查及编辑实例

STEP 1 打开模型文件

1）启动 HyperMesh，并选择 ANSYS 模板。

2）单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\下找到 cover.hm 文件并打开。模型包含 3 个组件，只有 shells 组件中的单元处于显示状态，如图 3-75 所示。

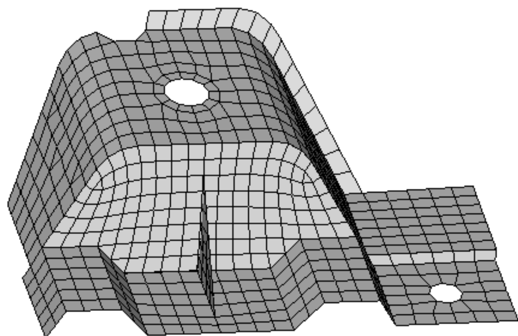


图 3-75　shells 单元模型

STEP 2 检查模型中的自由边

1）在 Tool 页面中，选择 edges 面板。

2）激活选择器 comps，选择图形区中的任意一个单元，包含这个单元的组件将被选中。

3）单击 find edges 按钮，沿面单元的自由边生成了红色的 1D 线单元（见图 3-76），它们被放置于一个名为^edges 的新组件中。注意在模型的内部也生成了一些线单元，说明在这些区域存在自由边，即节点没有耦合。

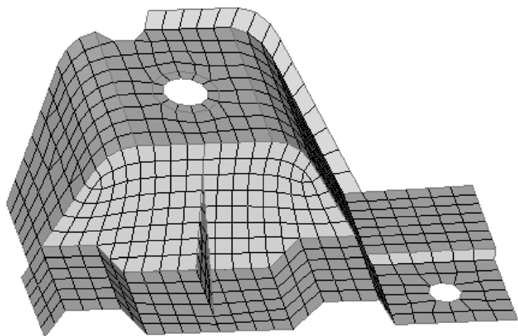


图 3-76　红色的 1D 线单元

注意：任何前面有符号“^”的组件在输出时都不会被写入求解器的输入文件。

4）单击 Shaded Elements and Mesh Lines 按钮。

5）仔细检查红色的 1D 线单元，尝试在连续的网格中寻找缝隙。

6）在 Model 浏览器中，关闭 shells 组件的单元显示。此时，仅有自由边显示在图形区，如图 3-77 所示。通过对比图 3-76 和图 3-77，就能发现位于模型内部的红色边线就是几何关

系不正确的非正常的自由边，应予以消除。

7）在 Model 浏览器中，开启 shells 组件的单元显示。

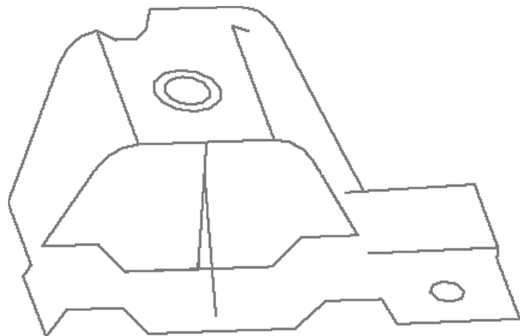


图 3-77　仅显示自由边

STEP 3 使用 edges 面板修正面单元的连续性

1）确认位于 edges 面板。

2）将 tolerance 设置为 0.01。

3）激活选择器 comps，选择图形区中的任意一个单元，包含这个单元的组件将被选中。

4）单击 preview equiv 按钮。

状态栏给出提示信息“81 nodes were found”。当相邻两个节点之间的距离等于或小于容差 0.01 的距离范围时，在两个节点之间就生成一个临时节点。需要注意的是，对于非正常的自由边，如果不是在所有节点处都生成了临时节点，则表明还需要指定更大的容差。

5）增大 tolerance 值，例如 0.1，直至找到如图 3-78 所示的 96 个节点。

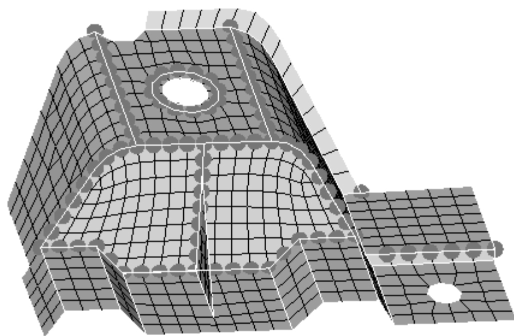


图 3-78　利用 preview equiv 生成的临时节点

注意：不要设置太大的 tolerance 值。虽然 96 个点可以被识别，但是过大的容差值会在节点合并时破坏某些网格（如果容差值比正常单元的最小边长还大）。

6）单击 equivalence 按钮，合并这 96 个重合节点。

7）旋转并观察模型，确保所有的网格都是完好的。

8）单击 delete edges 按钮，删除^edges 组件及内部的 1D 线单元。

STEP 4 再次检查面单元的连续性

1）此时仍在 edges 面板。

2）单击 find edges 按钮，观察生成的 1D 线单元，它们应只出现在边界区域。

3）在 Model 浏览器中，关闭 shells 组件的单元显示。此时，仅有自由边显示在图形区，且都位于边界区域，如图 3-79 所示。

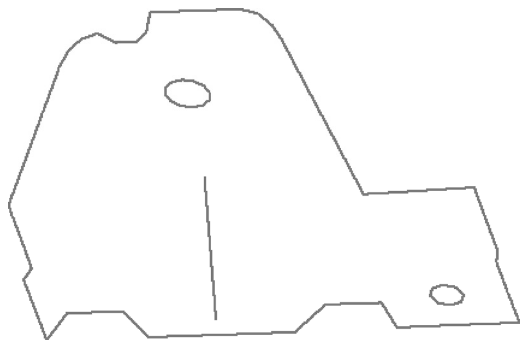


图 3-79　位于边界的自由边

4）单击 delete edges 按钮，删除^edges 组件及内部的 1D 线单元。

5）在 Model 浏览器中，开启 shells 组件的单元显示。

6）单击 return 按钮，退出 edges 面板。

STEP 5 利用 normals 面板调整单元法向

1）在 Tool 页面中，选择 normals 面板。

2）确认位于 elements 子面板，并选择 vector display normals 选项。

3）激活 comps 选择器，选择图形区中的任意一个单元，包含这个单元的组件将被选中。

4）单击 display normals 按钮。

矢量箭头始于单元的质心，显示了单元的法线方向。注意，不是所有的矢量箭头都始于同一侧，如图 3-80 所示。在某些有限元分析中，如接触分析中要求单元法向必须一致。

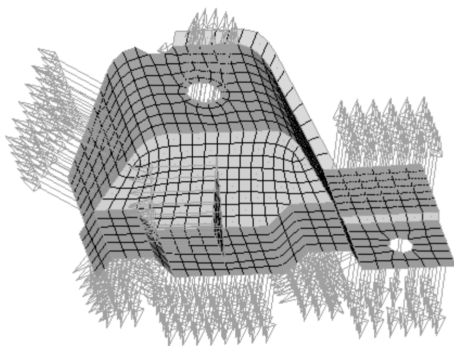


图 3-80　以箭头显示单元法向

5）将 size 设置为 5，再单击 display normals 按钮，箭头的大小将发生改变。当 size 设置为 0 时，箭头大小为屏幕区域的 10%。

6）将 vector display normals 选项切换为 color display normals。

7）单击 display normals 按钮。

单元的法向将用颜色显示，如图 3-81 所示。网格的红色一侧是法线的正方向，而蓝色的一侧是法线的负方向。注意，单元的两面分别显示红色和蓝色。

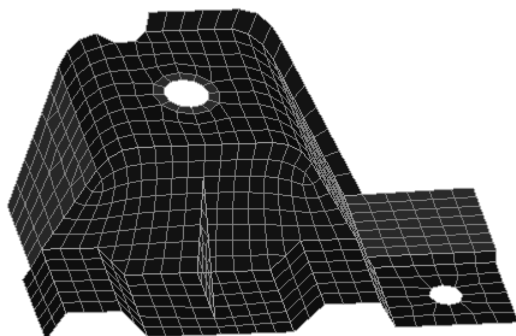


图 3-81　以颜色显示单元法向

8）激活 orientation 下面的 elem 选择器。

9）选择图 3-81 中的任意一个蓝色单元。

10）单击 adjust normals 按钮，所有单元的两面分别显示为同一种颜色，红色或蓝色。

11）单击 return 按钮，退出 normals 面板。

STEP 6 利用 check elems 面板检查单元质量

1）在 Tool 页面中，选择 check elems 面板。

2）选择 2-d 子面板。

3）确认 jacobian 值为 0.7。

4）单击 jacobian 按钮，检查是否有 jacobian 值小于 0.7 的单元。jacobian 值小于 0.7 的单元将高亮显示，如图 3-82 所示。

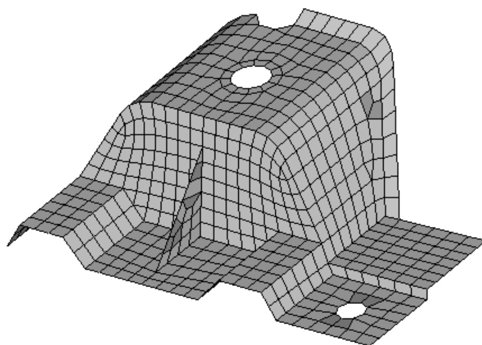


图 3-82　jacobian 值小于 0.7 的单元

5）在图形区选中一个单元，将弹出新的窗口，显示并列出被检查单元的各项质量检查结果。

6）单击鼠标左键或右键，关闭弹出窗口。

7）在面板菜单的右侧，将 standard 切换为 assign plot。

8）单击 jacobian 按钮，再次检查单元质量。每个单元以云图方式显示 jacobian 值，红色单元的 jacobian 值小于阈值 0.7，如图 3-83 所示。

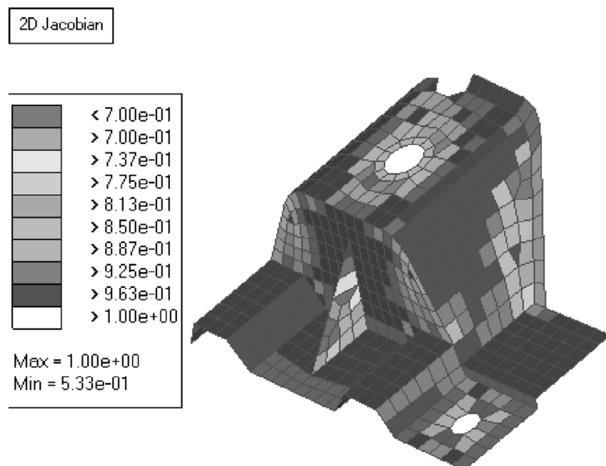


图 3-83　以云图方式显示 jacobian 值

9）确认 quads 下面的 min angle 值为 45。

10）单击 quads 下面的 min angle 按钮，检查是否有内角小于 45°的四边形单元，如图 3-84 所示。

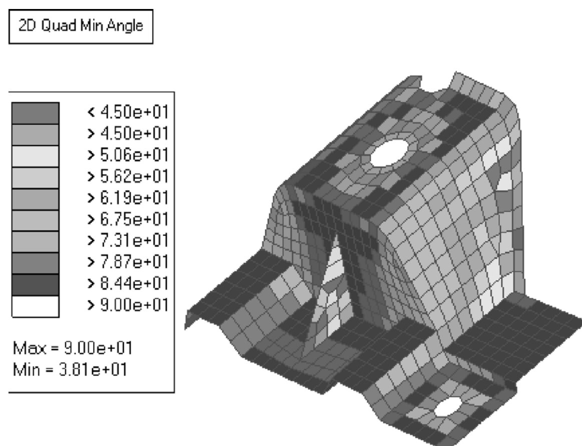


图 3-84　以云图方式检查四面形单元的最小内角

11）确认 quads 下面的 max angle 值为 135。

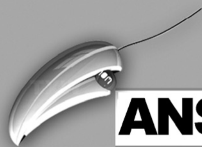
12）单击 quads 下面的 max angle 按钮，检查是否有内角大于 135°的四边形单元，如图 3-85 所示。

13）单击 return 按钮，退出 check elems 面板。

STEP 7 使用 automesh 面板为肋板重新划分单元

通过第 6 步发现肋板处的网格质量较差，本步骤将修正部分存在质量问题的单元。

1）按快捷键〈F12〉，进入 automesh 面板。



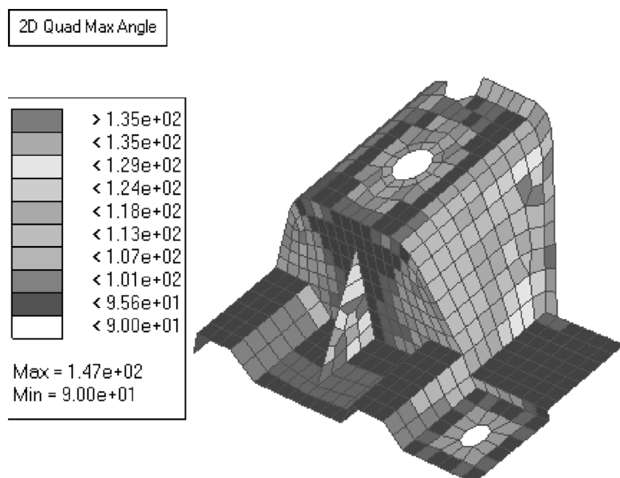


图 3-85　以云图方式检查四面形单元的最大内角

2）选择 size and bias 子面板。

3）将对象选择器由 surfs 切换为 elems。

4）将网格划分模式设置为 interactive。

5）将 element size 设置为 3.5。

6）在图形区选择两个单元，一个单元位于肋板，另一个单元位于肋板下方且与肋板垂直的面上。

7）单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by face，选中需要重划分的单元。

8）单击 mesh 按钮，进入网格划分模块。

9）在 density 子面板中，将肋板斜边的单元密度设置为 9，将肋板短边的单元密度设置为 5，保持其他单元边的密度不变，如图 3-86 所示。

10）进入 mesh style 子面板。

11）在 mesh method 下面，将 autodecide 切换为 free（unmapped）。

12）在 mesh method 下面，单击 set all 按钮。

13）单击 mesh 按钮，预览网格，如图 3-87 所示。

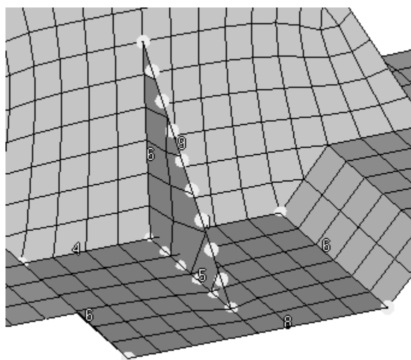


图 3-86　调整单元边的密度

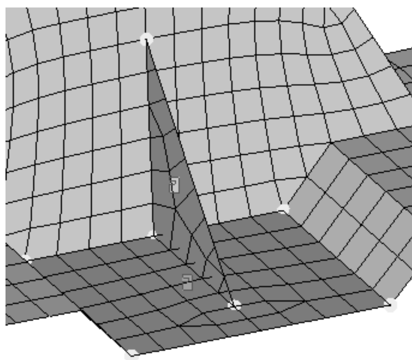


图 3-87　预览网格

14）进入 checks 子面板，检查单元的 jacobian、quads: min angle 和 quads: max angle。检查结果显示，所有单元都满足角度检查指标要求，只有两个单元的 jacobian 值小于 0.7，最小值为 0.68，仍可视为质量良好的单元。

15）单击 return 按钮，接受所划分的网格，并返回 automesh 面板。

16）单击 return 按钮，退出 automesh 面板。

STEP 8 使用 smooth 面板调整单元节点

1）在 2D 页面中，选择 smooth 面板。

2）选择 plates 子面板。

3）激活 elems 选择器，选择肋板下方且与肋板垂直的面上的一个单元。

4）单击 elems 按钮，在弹出的选项中选择 by face，选中需要进行 smooth 操作的单元。

5）将 iterations 设置为 10。

6）将光滑算法由 autodecide 切换为 shape corrected。

7）单击 smooth 按钮，微调网格节点的位置。

8）单击 return 按钮，退出 smooth 面板。

STEP 9 消除一个区域的三角形单元

1）在 2D 页面中，选择 edit element 面板。

2）进入 split 子面板。

3）激活 splitting line: points 选择器，在 4 个位置单击鼠标左键，画出一条临时曲线，如图 3-88 所示。

4）单击 split 按钮，以所画线切分单元，如图 3-89 所示。

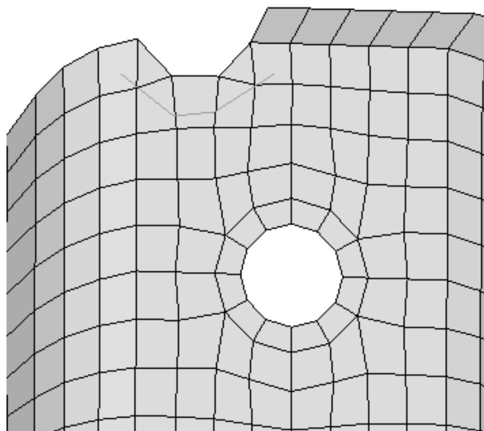


图 3-88 选择的 4 个点

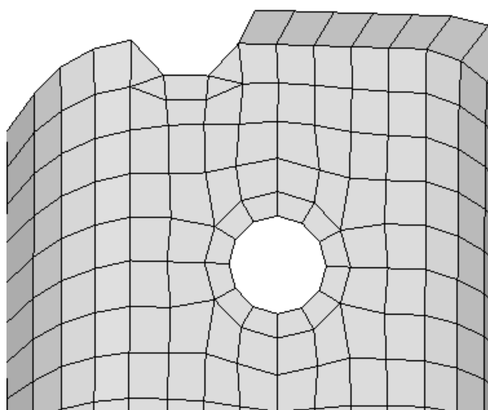


图 3-89 分割后的网格

5）进入 combine 子面板。

6）确认单元合并方法为 combine to quad。

7）选择图 3-89 中两个相邻的三角形单元。

8）单击 combine 按钮，将两个三角形单元合并为一个四面形单元。

9）重复步骤 7）和 8），合并另外两个相邻的三角形单元，结果如图 3-90 所示。

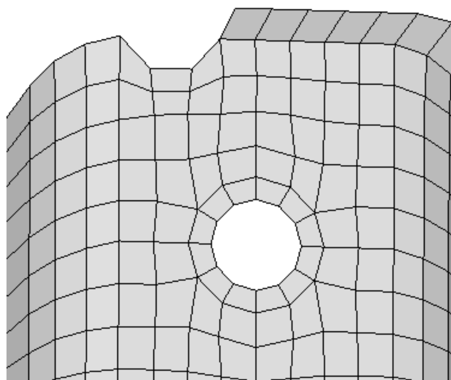


图 3-90　三角形单元合并为四边形单元

STEP 10 动态调整节点位置以改善单元质量

1）进入 cleanup 子面板。

2）确认单元选择方式为 displayed elems。

3）单击 cleanup 按钮，弹出 element cleanup 面板菜单。该面板菜单可以检查单元质量，动态调整节点位置。

单元质量以不同颜色显示，如图 3-91 所示。无色表示该单元满足质量检查指标，黄色表示该单元至少有一项指标介于 warning 和 unacceptable 之间，红色表示该单元至少有一项指标超出了 unacceptable 的范围。在第 9 步生成的单元中，有两个单元显示为红色，一个单元显示为黄色。

4）取消勾选 warpage 和 jacobian 复选框，只勾选 max angle 复选框。

5）模型有 3 个单元显示为红色。

6）激活 node 选择器，用鼠标左键拖动红色单元的节点并在附近移动，直到单元不再显示为红色。

7）重复步骤 6），修改另外两个单元，如图 3-92 所示。

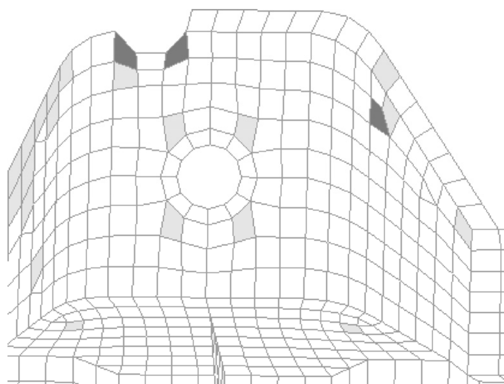


图 3-91　单元质量以不同颜色显示

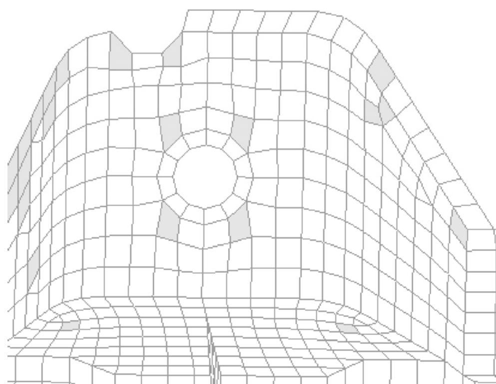


图 3-92　通过移动节点来改善单元质量

8）单击 return 按钮，退出 element cleanup 面板，返回 edit element 面板。

9）单击 return 按钮，退出 edit element 面板。

STEP 11 通过 qualityindex 面板优化单元质量

1）在 2D 页面中，选择 qualityindex 面板。

2）单击 cheanup tools 按钮。

3）激活 node optimize 按钮，在图形区中单击几个经过修改的单元的节点。单击节点时，以最优化 qualityindex 值为目标，该节点将自动调整位置。

4）激活 element optimize 按钮，在图形区中单击几个经过修改的单元。单击单元时，以最优化 qualityindex 值为目标，该单元的节点将自动调整位置。

5）激活 modify hole & washers 按钮。

6）选择 radial 参量，并勾选 edit 复选框。

7）单击图 3-93 所示的节点，显示出 radius 值为 5.97。

8）将 radius 值改为 7。

9）将 remesh number of layers 设置为 3。

10）再次单击图 3-93 所示的节点，对 washer 周围的单元进行重划分，如图 3-94 所示。

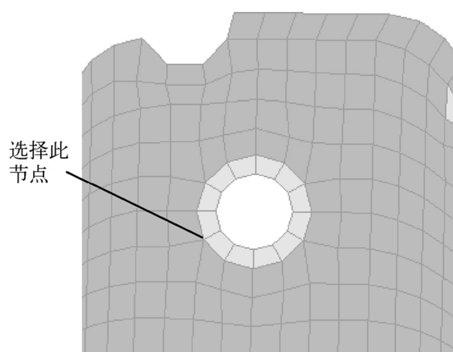


图 3-93　选择 washer 周围的节点

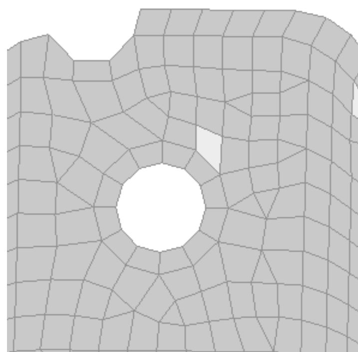


图 3-94　对 washer 周围的单元进行重划分

11）单击 return 按钮，退出 qualityindex 面板。

STEP 12 在小孔周围创建一圈 washer

1）在标签区 Utility 选项卡中，选择 Geom/Mesh 页面，再单击 Add Washer 按钮。

2）激活 nodes 选择器，选择图 3-95 所示的小孔内径处的一个节点。

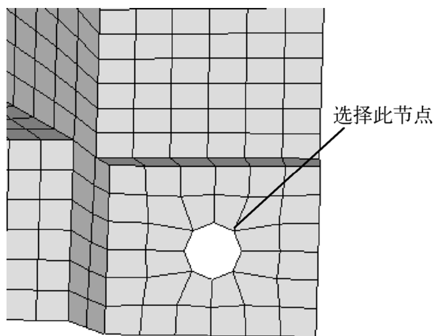


图 3-95　选择小孔内径处的一个节点

3）单击 proceed 按钮，弹出 Add Washer along a Circular Hole 对话框。

4）将 Scale 切换为 Width，将 Value 设置为 3。

5）勾选 Minimum number of nodes around the hole 复选框。

6）将 Density 设置为 12，如图 3-96 所示。

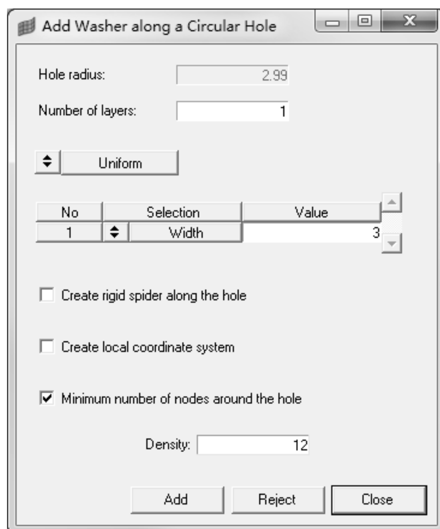


图 3-96　Add Washer along a Circular Hole 对话框

7）单击 Add 按钮，则小孔周围的单元进行重划分，如图 3-97 所示。

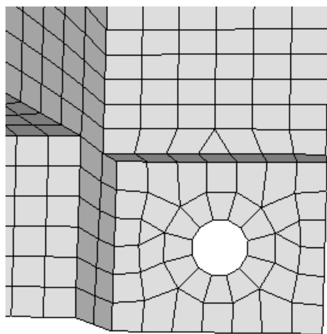


图 3-97　在小孔周围生成 washer

8）单击 Close 按钮，关闭 Add Washer along a Circular Hole 对话框。

STEP 13 针对不同目的映射网格

通过网格映射工具，可以将不相连的网格进行连接。

1）在 Model 浏览器中，开启 IMPRINT1 组件的单元显示。

2）在 2D 页面中，选择 mesh edit 面板。

3）选择 imprint 子面板。

4）选择 IMPRINT1 组件作为 source，shells 组件作为 destination，将 remain 设置为 destination。

5）单击 create 按钮。

图 3-98 和图 3-99 显示了映射前和映射后的网格。可以看到，IMPRINT1 组件的网格被映射到 shells 组件中的网格，为了完成网格连接，shells 组件中的网格进行了重划分。

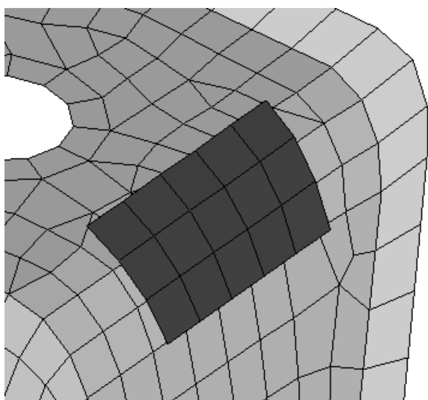


图 3-98 映射前的网格-未连接

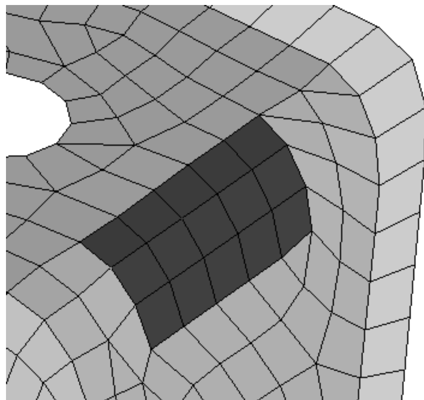


图 3-99 映射后的网格-已连接

6）单击 reject 按钮，撤销映射操作。

7）保持之前的设置不变，勾选 elems to destination comp 复选框。

8）单击 create 按钮。

图 3-100 显示了映射后的网格，与图 3-99 不同的是，IMPRINT1 组件中的网格已被移到 shells 组件中。

9）单击 reject 按钮，撤销映射操作。

10）保持之前的设置不变，只将 remain 设置为 source。

11）单击 create 按钮。

图 3-101 显示了映射后的网格，与图 3-100 不同的是，shells 组件中的网格被映射到 IMPRINT1 组件中的网格。

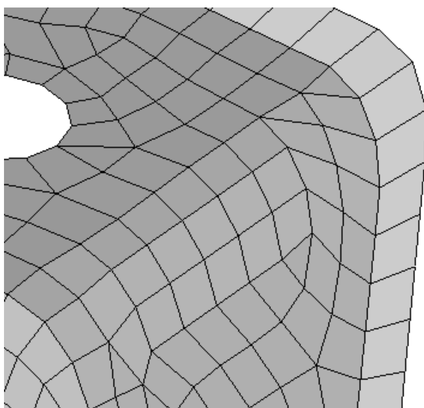


图 3-100 映射后的网格

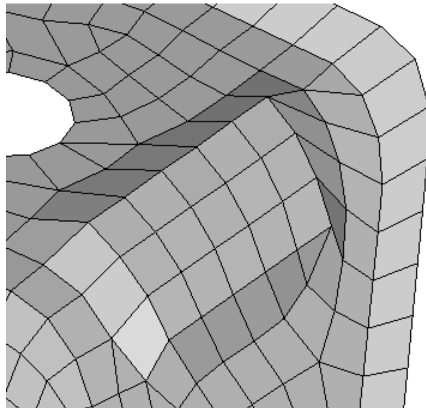


图 3-101 映射后的网格

12）单击 reject 按钮，撤销映射操作。

STEP 14 针对不同目的延伸网格

通过网格延伸工具，可以将不相连的网格进行连接。

1）在 Model 浏览器中，关闭 IMPRINT1 组件的单元显示，开启 EXTEND 组件的单元显示。

2）确认位于 mesh edit 面板。

3）选择 extend 子面板。

4）选择图 3-102 所示的节点作为 source，shells 组件作为 destination，将 projection 设置为 along vector，按图 3-102 所示选择 N1 和 N2 节点定义延伸方向。

5）单击 create 按钮。

图 3-103 显示了网格延伸的结果。可以看到，为了连接网格，shells 组件的网格进行了重划分，而 EXTEND 组件中的网格被拉长了。

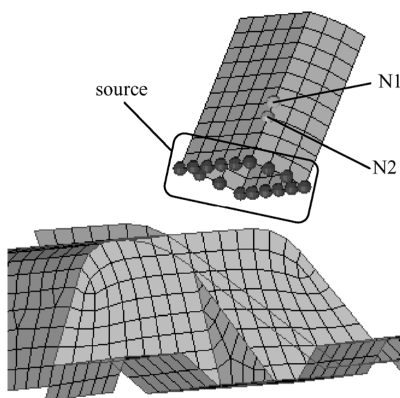
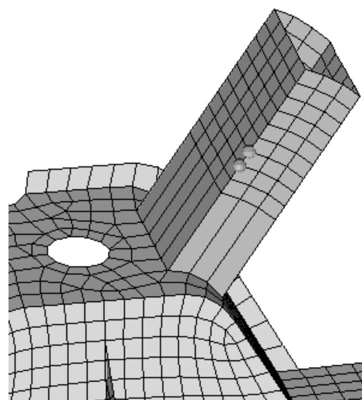


图 3-102　选择节点

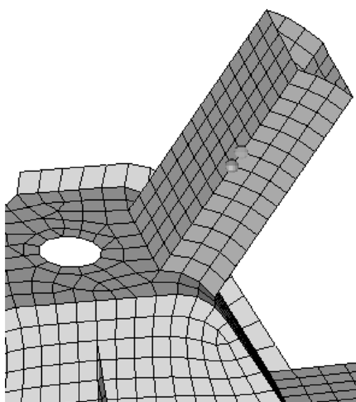

图 3-103　网格延伸的结果

6）单击 reject 按钮，撤销延伸操作。

7）保持之前的设置不变，勾选 remesh extension 复选框。

8）单击 create 按钮。

图 3-104 显示了网格延伸的结果。与图 3-103 不同的是，EXTEND 组件中的单元进行了重划分，以改进单元质量。


图 3-104　网格延伸的结果-remesh extension



9）单击 reject 按钮，撤销延伸操作。

10）单击 return 按钮，退出 mesh edit 面板。

11）在 Model 浏览器中，关闭 EXTEND 组件的单元显示。

12）如果需要，保存模型，命名为 cover_completed.hm。

至此， cover.hm 模型的网格质量检查及编辑已经完成了。本实例综合利用了网格质量检查工具和编辑工具，得到了质量较好的网格模型。

3.7 本章小结

1）有限元网格的好坏直接关系到计算与分析的准确度，是有限元分析的关键。良好的网格是提高仿真可信度的前提，粗糙的网格将得到不精确甚至错误的结果。

2）HyperMesh 具有很强的几何模型处理、网格划分、网格编辑能力。本章给出了 5 个实例，它们源于 HyperMesh 教程，但都进行了改造，以适应 ANSYS 求解器的需要。

3）本章的实例提供了 HyperMesh 入门的基本知识，如要更全面地掌握 HyperMesh 网格划分技术，读者应参考 HyperMesh 教程。

第 4 章　有限元装配技术

工程结构大多是装配体，涉及各零件的连接关系，如螺栓连接、焊接、轴承连接和铰接等。如何准确模拟装配关系是有限元分析的关键和难点。

另一方面，复杂的工程结构通常包含梁结构、板壳结构以及实体结构。为节省计算资源并提高计算精度，须分别建立梁单元、板壳单元和实体单元，同时考虑各种单元之间的连接关系，这给有限元建模和分析带来了困难。

在连接有不同自由度的单元时必须留心，因为在界面处可能会发生不协调的情况。如果单元彼此不协调，求解时会在两种单元之间传递不适当的力或位移。为保证协调，两个单元必须有相同的自由度。此外，自由度必须是耦合的，即它们必须连续穿过界面处单元的边界。

本章详细介绍了基于 ANSYS 与 HyperMesh 的实体-板壳-梁单元的连接技术和装配体连接技术。这些连接技术包括节点耦合、刚性区域 CERIG、柔性连接 RBE3、MPC184 刚性梁单元、MPC 算法和焊点等。实际建模时，用户可灵活选择各种方法。

4.1　实体-板壳-梁单元连接技术

4.1.1　实体-实体连接技术

实体与实体的连接比较简单，主要有两种方法：节点耦合和 MPC 算法。

1. 节点耦合

节点耦合是指共享不同单元的重合节点，这种连接方式最简单，且最有效。建立有限元模型时，应使用同一种实体单元（如 SOLID185 等）划分网格，但可分别定义各实体的材料属性。

2. MPC 算法

MPC 算法可用于连接非协调网格，如六面体与四面体单元的交界面（见图 4-1）。ANSYS 使用目标单元 TARGE170 和接触单元 CONTA173 或 CONTA174 定义 MPC 算法。第 15.1 节介绍了面-面接触建模的详细内容，对于 MPC 算法，仅仅是单元选项和实常数设置不同而已。

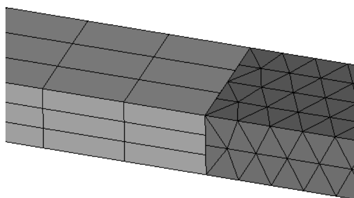


图 4-1　六面体与四面体单元的交界面

（1）单元选项

仅需设置接触单元 CONTA173/CONTA174 的单元选项，建议按表 4-1 设置单元选项。

表 4-1　为 CONTA173/CONTA174 设置单元选项

K2=2	MPC algorithm，使用 MPC 算法
K4=2	Node: Normal to target/CERIGID，选择适用范围最广的节点探测方法
K5=1	Close gap，关闭初始间隙
K9=1	Exclude，关闭初始穿透
K12=5	Bonded（always），总是绑定

（2）实常数

一般地，保持所有默认值可满足工程需要。

4.1.2 实体-板壳连接技术

实体单元节点具有 3 个平动自由度，板壳单元节点具有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。为确保自由度协调，可根据实体与板壳连接的具体情况，选用不同的连接方法。本书提供了两种方法：节点耦合和 MPC 算法。

1．节点耦合

尽管实体单元节点缺少转动自由度，但在图 4-2 所示的实体-板壳结构中，只须耦合实体与板壳的连接节点，就可保证自由度协调。

2．MPC 算法

在图 4-3 所示的实体-板壳结构中，板壳形成平面，由于其节点具有转动自由度，即使采用了节点耦合，也可绕连接交线转动。在这种情况下，可采用 MPC 算法连接非协调网格。ANSYS 使用目标单元 TARGE170（覆盖于实体单元表面）和接触单元 CONTA175（位于板壳单元边界）定义 MPC 算法。第 15.2 节介绍了点-面接触建模的详细内容，对于 MPC 算法，仅仅是单元选项和实常数设置不同而已。

注意：对于 MPC 算法，CONTA175 支持高阶下伏单元。

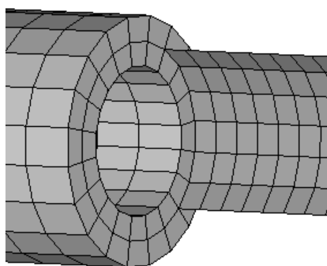


图 4-2　节点耦合连接实体与板壳单元

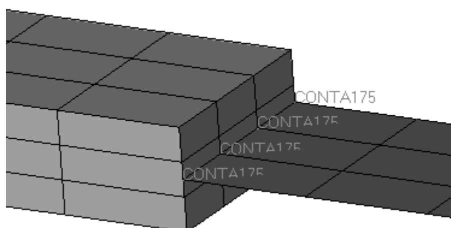


图 4-3　MPC 算法连接实体与板壳单元

（1）单元选项

仅须设置接触单元 CONTA175 的单元选项，建议按表 4-2 设置单元选项。

表 4-2　为 CONTA175 设置单元选项

K2=2	MPC algorithm，使用 MPC 算法
K5=1	Close gap，关闭初始间隙
K9=1	Exclude，关闭初始穿透
K11=1	Include，考虑板壳的厚度
K12=5	Bonded（always），总是绑定

（2）实常数

一般地，保持所有默认值可满足工程需要。

4.1.3 实体-梁连接技术

实体单元节点具有 3 个平动自由度，梁单元节点具有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度。为确保自由度协调，可根据实体与梁连接的具体情况，选用不同的连接方法，本书提供了两种方法：刚/柔性连接和 Surface-Based Constraints。

1. 刚/柔性连接

刚/柔性连接是最简单的方法。例如，可用 MPC184 刚性梁单元连接梁的端点和实体节点，形成十字连接，如图 4-4 所示。当然，也可采用刚性连接 CERIG 或柔性连接 RBE3 进行连接，但它们均基于小变形理论，而 MPC184 刚性梁单元可用于大变形分析。

2. Surface-Based Constraints

Surface-Based Constraints 是一种特殊的 MPC 算法。这种方法需定义一个目标单元 PILOT（位于梁的端点）和一组接触单元 CONTA173/CONTA174（覆盖于实体单元表面），并设置相应的单元选项和实常数，如图 4-5 所示。第 16.3 节给出了定义此类 MPC 算法的实例。

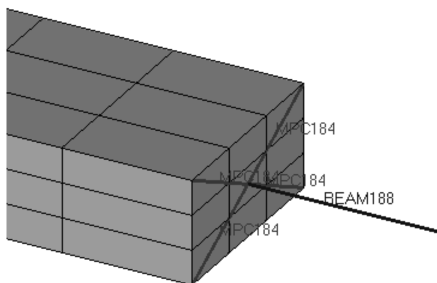


图 4-4　MPC184 刚性梁单元连接实体与梁单元

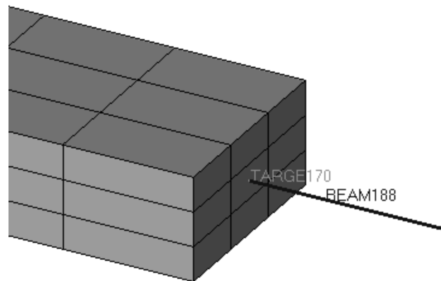


图 4-5　Surface-Based Constraints 连接实体与梁单元

（1）单元选项

对于目标单元 TARGE170，建议按表 4-3 设置单元选项。对于接触单元 CONTA173/CONTA174，建议按表 4-4 设置单元选项。

表 4-3　为 TARGE170 设置单元选项

K2=1	User definition，由用户控制目标单元 PILOT 的边界条件
K4=111111	激活自由度 ROTZ、ROTY、ROTX、UZ、UY、UX，MPC 方程包含 6 个自由度

表 4-4 为 CONTA173/CONTA174 设置单元选项

K2=2	MPC algorithm，使用 MPC 算法
K4=1 或 2	设置分布力约束或刚性面约束
K5=1	Close gap，关闭初始间隙
K9=1	Exclude，关闭初始穿透
K12=5	Bonded（always），总是绑定

对于目标单元 TARGE170，K4 用于控制 MPC 方程中包含的自由度。用户可以通过 6 位数设置 K4，这 6 位数分别代表了自由度 ROTZ、ROTY、ROTX、UZ、UY、UX。数字 1 代表自由度被激活，数字 0 代表自由度没有被激活。为了模拟实体-梁的连接，同时保证自由度协调，MPC 方程中应包含 6 个自由度，须设置 K4=111111。

对于接触单元 CONTA173/CONTA174，K4 用于控制接触面的行为，ANSYS 14.5 提供了 3 种方式：分布力约束、刚性面约束和耦合约束。其中，分布力约束和刚性面约束可以用于实体-梁的连接；耦合约束是一种特殊的约束方式，可在特殊场合下使用。

① K4=1，Force-Distributed Constraint（分布力约束），施加在控制节点 PILOT 上的力或位移通过形函数均匀分布到接触节点上，这与柔性连接 RBE3 相似，如图 4-6 所示。

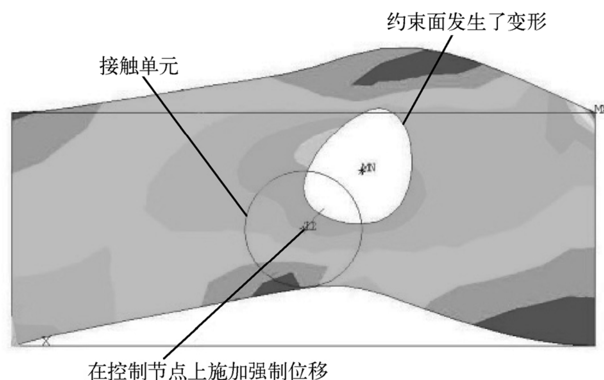


图 4-6 分布力约束

② K4=2，Rigid Surface Constraint（刚性面约束），通过定义控制节点 PILOT 把刚体运动施加到接触节点上，这与刚性连接 CERIG 相似，如图 4-7 所示。

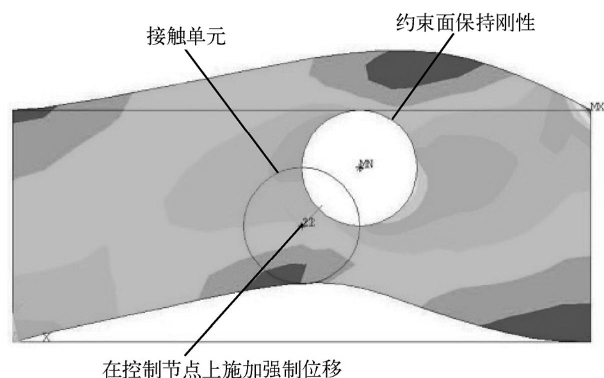


图 4-7 刚性面约束

③ K4=3，Coupling Constraint（耦合约束），接触节点与控制节点 PILOT 在指定方向的位移相同，这与自由度耦合 CP 相似，如图 4-8 所示。

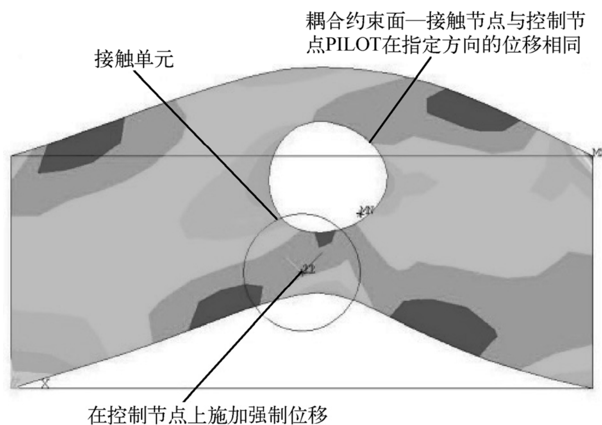


图 4-8　耦合约束

图 4-8 中，控制节点 PILOT 和接触节点的节点坐标系被旋转了 45°。通过设置 PILOT 节点的单元选项 K4，在约束方程中只耦合自由度 UX，不耦合自由度 UY。结果显示，接触节点在 UX 方向（已被旋转了 45°）的位移保持为常数，且与控制节点 PILOT 的 UX 方向位移相同，而接触节点的 UY 方向没有受到约束，可以自由变形。

（2）实常数

一般地，保持所有默认值可满足工程需要。

4.1.4 板壳-板壳连接技术

板壳与板壳的连接比较简单，主要有两种方法：节点耦合和 MPC 算法。

1．节点耦合

对于图 4-9 所示的板壳结构，节点耦合连接方式最简单，且最有效。建立有限元模型时，应使用同一种板壳单元（如 SHELL181 等）划分网格，但可分别定义各板壳的横截面和材料属性。

2．MPC 算法

对于图 4-10 所示的板壳结构，可使用 MPC 算法进行连接。与实体-实体连接类似，ANSYS 使用目标单元 TARGE170 和接触单元 CONTA173 或 CONTA174 定义 MPC 算法。

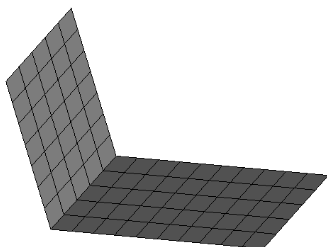


图 4-9　节点耦合连接板壳单元

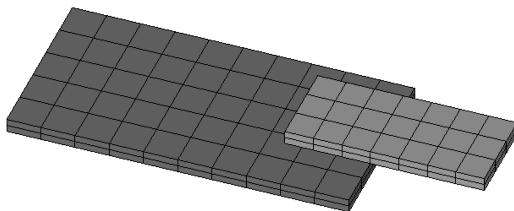


图 4-10　MPC 算法连接搭接的板壳（显示出厚度）

（1）单元选项

仅须设置接触单元 CONTA173/CONTA174 的单元选项，建议按表 4-5 设置单元选项。

表 4-5　为 CONTA173/CONTA174 设置单元选项

K2=2	MPC algorithm，使用 MPC 算法
K4=2	Node: Normal to target/CERIGID，选择适用范围最广的节点探测方法
K5=1	Close gap，关闭初始间隙
K9=1	Exclude，关闭初始穿透
K11=1	Include，考虑板壳的厚度
K12=5	Bonded（always），总是绑定

（2）实常数

一般地，保持所有默认值可满足工程需要。

4.1.5 板壳-梁连接技术

与实体-梁连接类似，板壳与梁的连接也有两种方法：刚/柔性连接和 Surface-Based Constraints。

1. 刚/柔性连接

尽管三维板壳单元和梁单元的节点都有 6 个自由度，但是，板壳单元的自由度 ROTZ（见图 2-16，单元坐标系）是与平面内旋转刚度相联系的，这是一个虚构的刚度，即它不是数学计算的真实刚度。因此，板壳单元的自由度 ROTZ 不是真实的自由度。若三维梁单元仅有一个节点与三维板壳单元相连，将导致梁单元的旋转自由度（节点坐标系）与板壳单元的 ROTZ 自由度（单元坐标系）不协调。在这种情况下，可采用 MPC184 刚性梁单元将梁的端点和板壳单元节点连成十字，如图 4-11 所示。当然，也可采用刚性连接 CERIG 或柔性连接 RBE3 进行连接，但它们均基于小变形理论，而 MPC184 刚性梁可用于大变形分析。

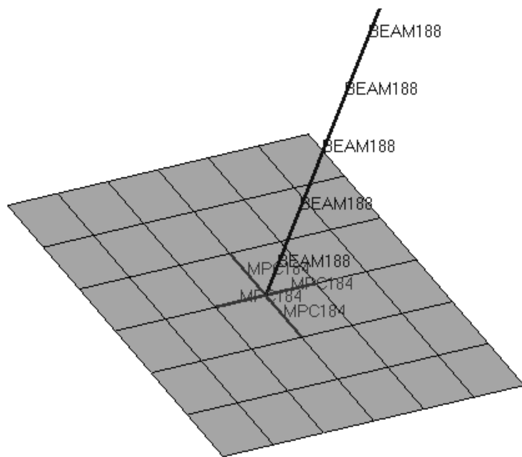


图 4-11　MPC184 刚性梁单元连接板壳与梁单元

2．Surface-Based Constraints

Surface-Based Constraints 是一种特殊的 MPC 算法。这种方法须定义一个目标单元 PILOT（位于梁的端点）和一组接触单元 CONTA175（位于板壳单元节点），并设置相应的单元选项和实常数，如图 4-12 所示。第 16.3 节给出了定义此类 MPC 算法的实例，需要注意的是，接触定义应选择 Point to surface。

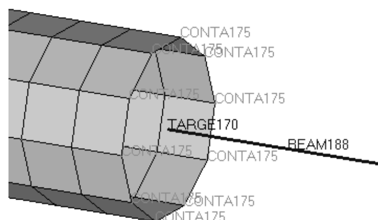


图 4-12　Surface-Based Constraints 连接板壳与梁单元

注意：① 对于 MPC 算法，CONTA175 支持高阶下伏单元。

② 目标单元和接触单元都是点单元，无需定义单元法向。

（1）单元选项

对于目标单元 TARGE170，建议按表 4-6 设置单元选项。对于接触单元 CONTA175，建议按表 4-7 设置单元选项。

表 4-6　为 TARGE170 设置单元选项

K2=1	User definition，由用户控制目标单元 PILOT 的边界条件
K4=111111	激活自由度 ROTZ、ROTY、ROTX、UZ、UY、UX，MPC 方程包含 6 个自由度

表 4-7　为 CONTA175 设置单元选项

K2=2	MPC algorithm，使用 MPC 算法
K4=0 或 1	设置刚性面约束或分布力约束
K5=1	Close gap，关闭初始间隙
K9=1	Exclude，关闭初始穿透
K11=1	Include，考虑板壳的厚度
K12=5	Bonded（always），总是绑定

对于目标单元 TARGE170，K4 用于控制 MPC 方程中包含的自由度。用户可以通过 6 位数去设置 K4，这 6 位数分别代表了自由度 ROTZ、ROTY、ROTX、UZ、UY、UX。数字 1 代表自由度被激活，数字 0 代表自由度没有被激活。为了模拟板壳-梁的连接，同时保证自由度协调，MPC 方程中应包含 6 个自由度，须设置 K4=111111。

对于接触单元 CONTA175，K4 用于控制接触面的行为，ANSYS 14.5 提供了 3 种方式：K4=0，Rigid Surface Constraint（刚性面约束）；K4=1，Force-Distributed Constraint（分布力约束）；K4=3，Coupling Constraint（耦合约束）。其中，刚性面约束和分布力约束可以用于板壳-梁的连接；耦合约束是一种特殊的约束方式，可在特殊场合下使用。

（2）实常数

一般地，保持所有默认值可满足工程需要。

4.2 螺栓连接

螺栓连接结构简单、装拆方便，使用时不受被连接件材料的限制，因此应用极广。在进行螺栓连接结构的数值分析时，通常有两种建模方法：一是建立螺栓连接的详细模型，二是建立螺栓连接的简化模型。前者模型复杂，需要大量的计算资源，适合分析局部细节，后者模型简单，计算效率高，适合结构整体分析。

4.2.1 实体螺栓连接模型

采用六面体单元建立螺栓、螺母、垫圈和法兰的详细模型。忽略螺栓和螺母的螺纹，并将它们整体建模。螺母与上垫圈、螺头与下垫圈、上垫圈与上法兰、下垫圈与下法兰、上法兰与下法兰的接触采用面-面接触模型模拟。在螺杆横截面插入预紧力单元，用于施加精确的预紧力。图 4-13 显示了实体螺栓连接模型的细节，包含 5 对接触对和一组预紧力单元。这种详细模型可表达出螺栓连接的真实情况，适用于精确分析局部细节[13]。第 15.7 节给出了建立实体螺栓连接模型的实例。

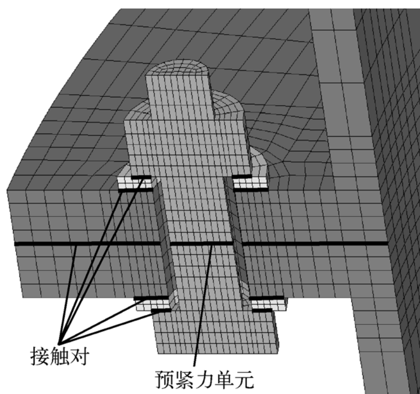


图 4-13 实体螺栓连接模型

4.2.2 刚性连接简化模型

法兰是板壳结构，可采用板壳单元建立模型。忽略螺栓头、螺母和垫圈，只采用一个梁单元模拟螺柱。螺柱的两端分别与法兰刚性连接，刚性单元形成蜘蛛网形式的放射状，将垫圈与法兰的接触面完全刚性化。这种简化的模型使用更少的单元，不模拟螺栓预紧和接触，计算效率高，适用于分析结构整体。若将螺柱也采用刚性单元模拟，则具有更高的计算效率。图 4-14 为螺栓连接简化模型。刚性单元为 CERIG 或 MPC184 刚性梁单元。

注意：① 由于螺栓预紧力的作用，在螺栓连接局部区域具有很高的连接刚度，不推荐柔性连接 RBE3。

② 使用 CERIG 做刚性连接时，如果主节点没有依附单元节点，则可在主节点建立质量单元 MASS21，并赋予极小的质量。

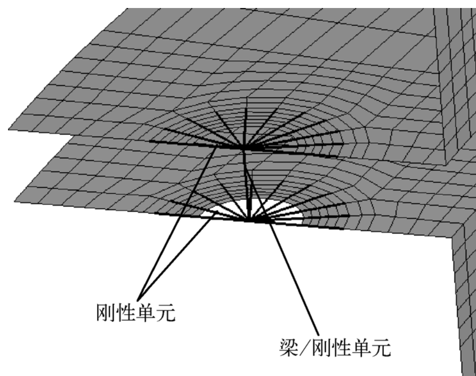


图 4-14　螺栓连接简化模型

4.3　焊接

焊接具有强度高、工艺简单、操作方便等优点，广泛应用于金属构件、壳体、桁架等制造业中，如汽车工业、桥梁建筑等。真实的焊接模拟较困难，常用的焊接简化模型为节点耦合和焊点。

4.3.1　节点耦合

节点耦合最简单，且最有效，这种简化模型适用于分析结构整体。建立有限元模型时，应使用同一种单元（如 SHELL181 等）划分网格，但可分别定义各实体的材料属性。

4.3.2　焊点

图 4-15 为焊点简化模型。两薄板之间填充了低阶六面体单元，用于模拟焊接材料。六面体单元的每个节点与薄板单元节点之间通过 RBE3 进行柔性连接，以传递力和力矩。与节点耦合相比，由于模拟了焊接材料，焊点更加接近物理事实。

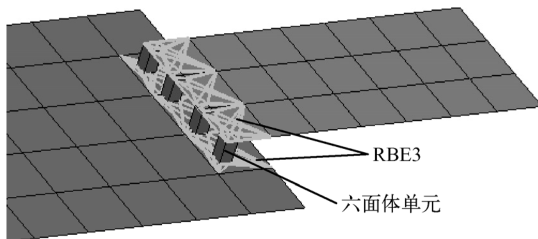


图 4-15　焊点简化模型

注意：HyperMesh 的 ANSYS 模板只支持较简单的焊点连接，而不支持图 4-15 所示的焊点连接。定义焊点时，可先将求解器模板切换为 OptiStruct 或 NASTRAN，再由 1D→connectors→spot 进入 spot 面板（见图 4-16），定义完焊点之后，再将求解器模板切换为 ANSYS。



图 4-16 spot 面板

4.4 轴承连接

滚动轴承是现代机器中广泛应用的部件之一，它是依靠主要元件间的滚动接触来支撑转动零件的。真实的轴承模型较复杂，在实际应用中，通常建立简化的轴承模型，即刚性连接、柔性连接和 Surface-Based Constraints。由于铰接与轴承连接相似，这些方法也能应用于铰接。

4.4.1 刚性连接

图 4-17a 所示为轴承连接简化模型 CERIG。一组 CERIG 连接孔的中心（MASS21 单元）与孔内节点，耦合所有自由度；另一个 CERIG 连接 MASS21 与梁单元的端点（主、从节点的选择并不重要），且放开 ROTZ 自由度（见图 4-18，不勾选 dof6）。

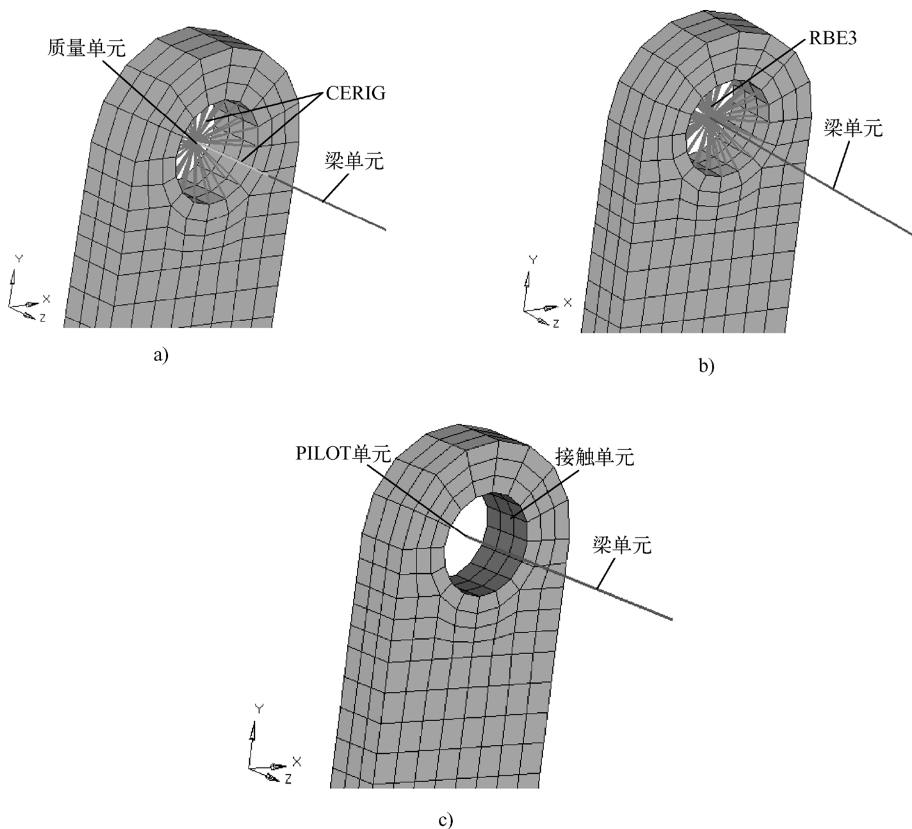


图 4-17 轴承连接简化模型

a) 刚性连接 CERIG b) 柔性连接 RBE3 c) Surface-Based Constraints

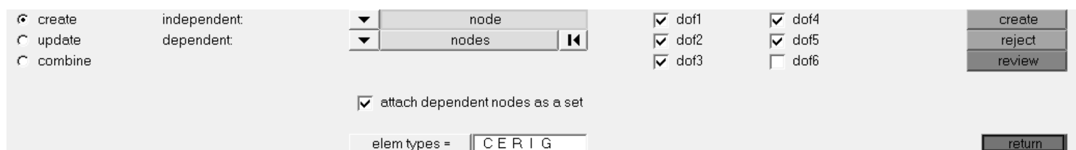


图 4-18　刚性连接-放开 ROTZ 自由度

注意：刚性连接（CERIG）基于小变形理论，用于大变形分析时应谨慎。由于形成刚性区域，可能引起局部应力集中，应小心使用。

4.4.2 柔性连接

柔性连接（RBE3）较简单，只需一组 RBE3，如图 4-17b 所示。对于轴承连接，需要注意必须放开主节点（梁单元的端点）一个转动自由度。例如，对于图 4-17b 所示的轴承连接，须放开 ROTZ 自由度（图 4-19，不勾选 rotz）。

注意：柔性连接（RBE3）基于小变形理论，用于大变形分析时应谨慎。



图 4-19　柔性连接-放开 ROTZ 自由度

4.4.3 Surface-Based Constraints

Surface-Based Constraints 是一种特殊的 MPC 算法。这种方法须定义一个目标单元 PILOT（位于梁的端点）和一组接触单元 CONTA173/CONTA174（覆盖于实体单元表面），并设置相应的单元选项和实常数，如图 4-17c 所示。第 16.3 节给出了定义此类 MPC 算法的实例。

1）单元选项

对于目标单元 TARGE170，建议按表 4-8 设置单元选项。对于接触单元 CONTA173/CONTA174，建议按表 4-9 设置单元选项。

表 4-8　为 TARGE170 设置单元选项

K2=1	User definition，由用户控制目标单元 PILOT 的边界条件
K4=011111	激活自由度 ROTY、ROTX、UZ、UY、UX，MPC 方程包含 5 个自由度

表 4-9　为 CONTA173/CONTA174 设置单元选项

K2=2	MPC algorithm，使用 MPC 算法
K4=1	设置分布力约束
K5=1	Close gap，关闭初始间隙
K9=1	Exclude，关闭初始穿透
K12=5	Bonded（always），总是绑定

对于 Force-Distributed Constraint（分布力约束），K4 用于控制 PILOT 单元的自由度。用户可以通过 6 位数去设置 K4，这 6 位数分别代表了自由度 ROTZ、ROTY、ROTX、UZ、UY、UX。数字 1 代表自由度被激活，数字 0 代表自由度没有被激活。对于图 4-17c 所示的轴承连接，须放开 ROTZ 自由度，耦合其余 5 个自由度。因此，应设置 K4=011111。

对于接触单元 CONTA173/CONTA174，K4 用于控制接触面的行为，ANSYS 14.5 提供了 3 种方式：分布力约束、刚性面约束和耦合约束，其中，只有分布力约束可以用于轴承简化模型。因此，只能设置 K4=1。

2）实常数

一般地，保持所有默认值可满足工程需要。

4.4.4 轴承连接算法对比

第 4.4.1～4.4.3 小节的轴承连接模型可模拟轴承转动，适用于装配体分析。实际上，在分析结构承受轴承力的静态响应时（不考虑轴承的转动），也可采用表 4-10 中的轴承力加载方法。

表 4-10　轴承连接算法的对比

项　　目	刚性接触	CERIG	RBE3	MPC 算法（Force-Distributed Constraint）
最大位移/mm	0.035	0.030	0.049	0.048
最大 von Mises 应力/MPa	98.3	50.0	86.0	84.1

通常认为轴承本身刚度较大，因此，刚性接触算法最接近实际情况（见图 4-20）。将其余算法与刚性接触算法对比，可知：

1）RBE3 算法与 MPC 算法（Force-Distributed Constraint）非常接近，它们都是柔性连接，使轴承加载面变形较大，如图 4-21 和图 4-22 所示。

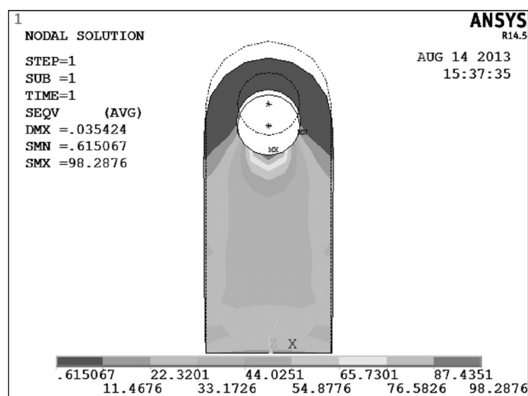


图 4-20　结构应力云图-刚性接触施加轴承力

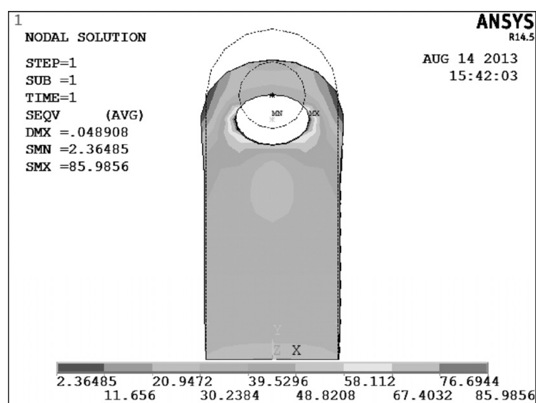


图 4-21　结构应力云图-RBE3 施加轴承力

2）CERIG 算法控制轴承加载面为刚性面，使轴承加载面变形偏小，如图 4-23 所示。

3）每种轴承连接模型均是简化模型，应根据实际情况合理选择轴承的连接模型。

说明： 为便于比较计算结果，所有算法均采用图 4-17a 所示的有限元网格。

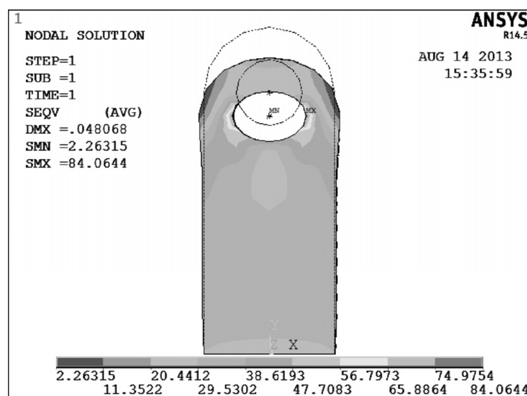


图 4-22　结构应力云图-MPC 算法施加轴承力

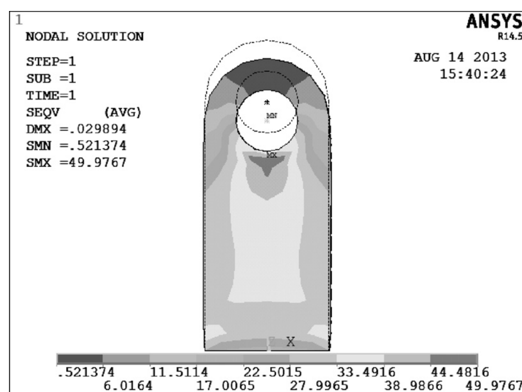


图 4-23　结构应力云图-CERIG 施加轴承力

4.5　本章小结

1）装配体的连接关系、实体-板壳-梁单元的连接技术是有限元分析的关键和难点。事实上，装配体的连接关系不限于本章提到的类型，连接方式也灵活多变。实际建模时，可灵活选择各种方法。

2）刚性区域 CERIG 和柔性连接 RBE3 使用的约束方程基于小变形理论，应谨慎用于大变形分析。值得注意的是，这两种连接方式的主节点必须是实际存在的单元节点。如果主节点没有依附单元节点，则可在主节点建立质量单元，并赋予极小的质量。

3）MPC 算法有多种应用，均支持大变形分析。对于大变形问题，MPC 方程在每次迭代后都更新，克服了传统约束方程只能适用于小变形问题的不足。Surface-Based Constrains 是一种特殊的 MPC 算法，可用来耦合接触面上的节点和目标面上的控制节点 PILOT 的运动。ANSYS 14.5 提供了 3 种方式：分布力约束（Force-Distributed Constraint）、刚性面约束（Rigid Surface Constraint）和耦合约束（Coupling Constraint）。分布力约束与柔性连接 RBE3 相似，刚性面约束与刚性连接 CERIG 相似，耦合约束与自由度耦合 CP 相似。

4）刚性区域 CERIG、MPC184 刚性梁单元、Rigid Surface Constraint 和 Coupling Constraint 都能形成刚性区域，可能引起局部应力集中，应小心使用。



第 5 章 加 载

有限元分析的主要目的是检查结构对一定载荷条件的响应。因此，在分析中指定合适的载荷条件是关键的一步。

本章主要介绍了 ANSYS 载荷的基本概念。ANSYS 和 HyperMesh 可用各种方式对模型加载，而且借助于载荷步选项，可以控制载荷在求解中如何使用，这将在后续章节以实例的方式进行详细介绍。

5.1 载荷的基本概念

在 ANSYS 的术语中，载荷（Loads）包括边界条件和外部或内部作用力函数，即位移边界和力边界。在不同的学科中，载荷的具体含义也不尽相同。在结构分析中，载荷的实例为位移、速度、加速度、力、压力、温度（热应变）和重力。

ANSYS 将载荷分为六类：DOF（自由度）约束、力（集中载荷）、表面载荷、体积载荷、惯性载荷及耦合场载荷[14]。

1）DOF constraint（自由度约束）将某个自由度用一个已知值固定。例如，在结构分析中，自由度约束被指定为位移和对称边界条件；在热力分析中，自由度约束被指定为温度和对流换热边界条件。

2）Force（力）是指施加于模型节点的集中载荷。例如，在结构分析中，力被指定为力和力矩；在热力分析中，力被指定为热流速率。

3）Surface load（表面载荷）是指施加于某个表面上的分布载荷。例如，在结构分析中，表面载荷为压力；在热力分析中，表面载荷为对流和热通量。

4）Body load（体积载荷）是指体积的或场载荷。例如，在结构分析中，体积载荷为温度；在热力分析中，体积载荷为热生成速率。

5）Inertia loads（惯性载荷）是指由物体惯性引起的载荷，主要在结构分析中使用，如重力加速度、角速度和角加速度。

6）Coupled-field loads（耦合场载荷）是以上载荷的一种特殊情况，将一种分析得到的结果用作另一分析的载荷。例如，可将磁场分析得到的磁力作为结构分析中的力载荷。

5.2 载荷步、子步和平衡迭代

5.2.1 载荷步

载荷步（Load step）仅仅是为了获得解答的载荷配置。在线性静态或稳态分析中，用户可以使用不同的载荷步施加不同的载荷组合。例如，在第一个载荷步中施加风载荷，在第二

个载荷步中施加重力载荷，在第三个载荷步中施加风和重力载荷以及一个不同的支承条件等。在瞬态分析中，多个载荷步加到载荷-时间历程曲线的不同区域。

图 5-1 显示了一个需要 3 个载荷步的载荷-时间历程曲线。第一个载荷步用于斜坡载荷，第二个载荷步用于恒定载荷，第三个载荷步用于卸载。

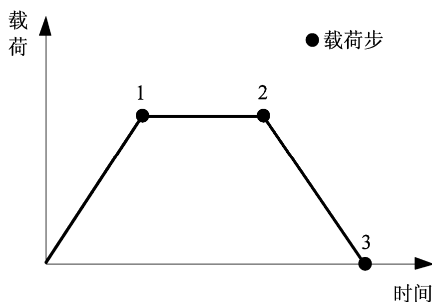


图 5-1　瞬态载荷-时间历程曲线

5.2.2 子步

子步（Sub step）表示求解过程中载荷步包括的点。由于不同的原因，有时需要使用子步。

1）在非线性静态或稳态分析中，使用子步逐渐施加载荷以便能提高求解精度。

2）在线性或非线性瞬态分析中，使用子步满足瞬态时间积分法则（为获得较精确的解，通常规定一个最小的时间积分步长）。

3）在谐响应分析中，使用子步获得谐波频率范围内多个频率处的解。

5.2.3 平衡迭代

平衡迭代是在给定子步下为了收敛而计算的附加解，仅用于收敛起着重要作用的非线性分析（静态或瞬态）中的迭代修正。

例如，如图 5-2 所示，对于 2D 非线性静态磁场分析，为了获得精确解，通常使用两个载荷步。第一个载荷步将载荷逐渐加载到 5～10 个子步，每个子步仅用一次平衡迭代。第二个载荷步得到最终收敛解，且仅有一个使用 15～25 次平衡迭代的子步。

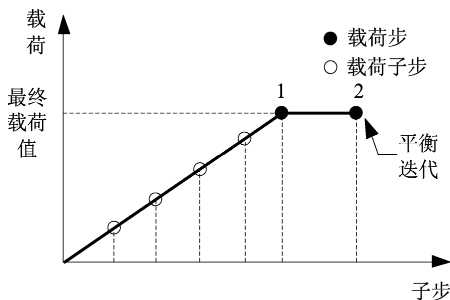


图 5-2　载荷步、子步和平衡迭代

5.3　时间的作用

在所有的静态和瞬态分析中，ANSYS 使用时间作为跟踪参数，而不论分析是否依赖于时间。其好处是在所有情况下可以使用一个不变的“计数器”或“跟踪器”，而不需要依赖于具体分析的术语。此外，时间总是单调增加的，且自然界中大多数事件的发生都要经历一段时间，不论该时间多么短暂。

显然，在瞬态分析或与速率有关的静态分析中，如蠕变或粘塑性分析，时间代表实际的、

按年月顺序的时间，用秒、分钟或小时表示且具有物理意义。在指定载荷-时间历程曲线的同时，在每个载荷步结束点赋时间值。

然而，在不依赖于速率的分析中，时间仅仅称为一个识别载荷步和子步的计数器，而不再表示具体的时间值。默认情况下，ANSYS 自动对 time 赋值。在载荷步 1 结束时，赋值 time=1；在载荷步 2 结束时，赋值 time=2……依此类推。载荷步中的任何子步将被赋给合适的、用线性插值得到的时间值。在这样的分析中，通过赋给自定义的时间值，就可建立自己的跟踪参数。例如，若要将 100 个单位的载荷施加到某载荷步上，可以将该载荷步的结束时间点指定为 100，以使载荷和时间值完全同步。

在后处理器中，如果得到一个变形-时间关系图，其含义与变形-载荷关系相同。这种技术非常有用。例如，在大变形屈曲分析中，其任务是跟踪结构载荷增加时结构的变形。

从时间的概念上讲，载荷步就是作用在给定时间间隔内的一系列载荷；子步为载荷步中的时间点，在这些时间点，求得中间解；两个连续子步之间的时间差称为时间步长或时间增量；平衡迭代纯粹是为了收敛而在给定时间点进行计算的迭代求解方法。

5.4 阶跃载荷与斜坡载荷

虽然前文已提及，在载荷步终点的载荷值为指定的值，但当在一个载荷步中指定一个以上的子步时，就出现了载荷加载方式是阶跃（Stepped）载荷还是斜坡（Ramped）载荷的问题。

1）如果载荷是阶跃的，那么全部载荷将施加于第一个载荷子步，且在载荷步的其余部分，载荷保持不变，如图 5-3a 所示。

2）如果载荷是逐渐递增的，那么在每个载荷子步，载荷值逐渐增加，且全部载荷出现在载荷步结束时，如图 5-3b 所示。

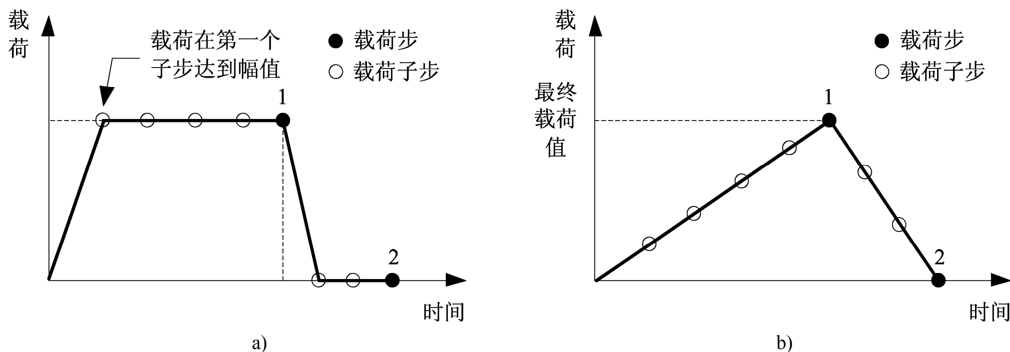


图 5-3 阶跃载荷与斜坡载荷

a) 阶跃载荷 b) 斜坡载荷

5.5 载荷的施加

ANSYS 可将载荷施加于实体模型（关键点、线和面）或有限元模型（节点和单元）。例如，用户可以在关键点（Keypoint）或节点（Node）施加集中力。无论怎样施加载荷，ANSYS

求解器期望所有载荷施加到有限元模型。因此，如果用户在实体模型施加了载荷，则 ANSYS 在求解开始时自动将载荷转换到节点和单元。

HyperMesh 的 Analysis 页面（见图 5-4）提供了各种载荷的施加工具，可以为实体模型或有限元模型施加载荷。本书在后续章节中将主要介绍使用 HyperMesh 施加边界条件和载荷的相关知识。

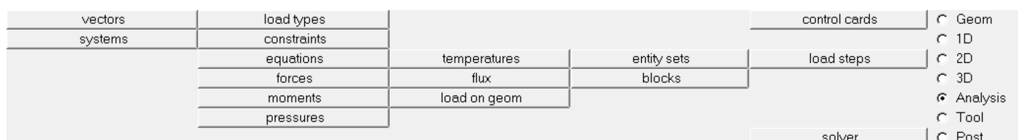


图 5-4　Analysis 页面

第 6 章　HyperMesh 与 ANSYS 的数据传递接口



ANSYS 是当前主流的 CAE 软件之一，其应用领域涵盖了通用工程和航空航天。ANSYS 能够求解结构、热、流体和电磁场模型，且支持广泛的分析类型，如静力分析、瞬态动力学分析、模态分析、谐响应分析、屈曲分析、谱分析、稳态热分析和瞬态传热分析等。ANSYS 支持线性分析和非线性分析。

HyperWorks 意识到 ANSYS 是当前 CAE 领域的主要求解器之一，并扩展了对 ANSYS 求解器的支持，包括单元类型、求解方法和文件格式。用户通过联合使用 HyperWorks 工具和 ANSYS 求解器可以达到事半功倍的效果。在有限元前处理过程中，用户可以利用 HyperMesh 为 ANSYS 定义单元、载荷和边界条件，然后输出后缀为.CDB 的模型文件，以供 ANSYS 求解。求解完成之后，可将 ANSYS 结果文件读入 HyperView 进行后处理。

本章介绍了 HyperMesh 与 ANSYS 的接口，并给出 6 个实例，详细讲解了如何利用 HyperMesh 为 ANSYS 设定单元选项、实常数、横截面、材料特性，定义边界条件、载荷和求解选项以及创建接触对。本章也详细讲解了如何利用 HyperMesh 为 ANSYS Workbench Mechanical 进行前处理。

6.1　HyperMesh 与 ANSYS 的接口

ANSYS 以脚本格式和二进制格式保存模型文件，HyperMesh 可以读入脚本格式的文件，即后缀为.CDB 的模型文件。新版的 ANSYS 采用 BLOCK 格式写出.CDB 模型文件，早期版本的 ANSYS（ANSYS 5.4 以及更早）采用 APDL 格式写出.CDB 模型文件，HyperMesh 可读入两种格式的.CDB 模型文件。图 6-1 和图 6-2 分别为 HyperMesh 的输入接口和输出接口。

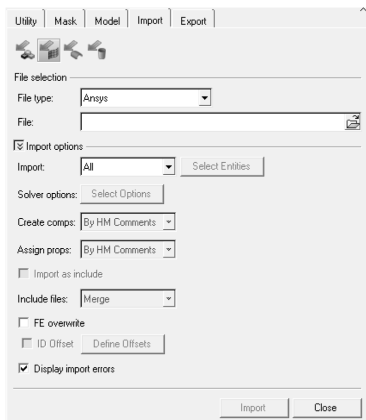


图 6-1　HyperMesh 的输入接口

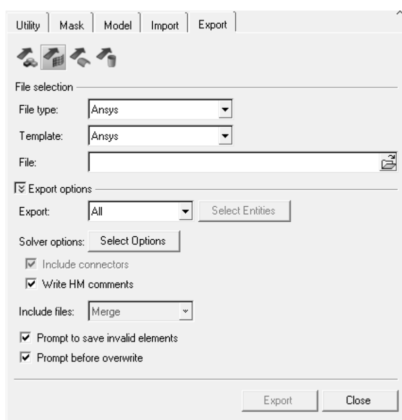
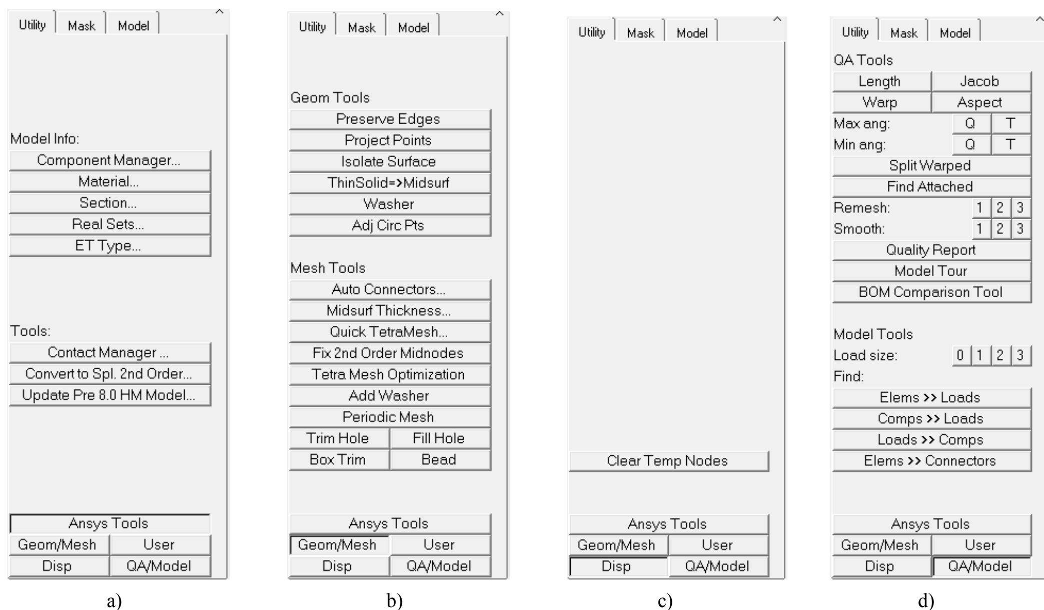


图 6-2　HyperMesh 的输出接口

图 6-1 所示的输入接口可以导入由 ANSYS 生成的.CDB 模型文件，以供 HyperMesh 使用。图 6-2 所示的输出接口可以将有限元模型导出为.CDB 文件，以供 ANSYS 使用。

值得注意的是，所有版本的 ANSYS 都能读入由 HyperMesh 输出的.CDB 模型，但 HyperView 12.0 只能读入由 ANSYS 13.0 及以下版本计算的结果文件。

HyperMesh 为 ANSYS 提供了实用的 Utility 选项卡（见图 6-3）。ANSYS Tools 页面包含与 ANSYS 模型设置相关的宏，提供了最重要的工具，可为 ANSYS 定义材料、横截面、实常数、单元类型等，还可为 ANSYS 创建接触对。Geom/Mesh 页面包含与创建、编辑几何模型和有限元网格相关的宏。User 页面仅包含用户自己创建的宏，默认为空白。Disp 页面仅包含清除临时节点（Clear Temp Nodes）的宏；QA/Model 页面包含与单元检查和载荷相关的宏。



a) b) c) d)

图 6-3 Utility 选项卡

a) Ansys Tools 页面 b) Geom/Mesh 页面 c) Disp 页面 d) QA/Model 页面

6.2 实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 建立分析模型

本实例讲解利用 HyperMesh 为 ANSYS 设定单元选项、实常数、横截面、材料特性、组件结构，定义边界条件、载荷和求解选项，并导入 ANSYS 进行静力分析。

HyperMesh 与 ANSYS 均不直接指定单位制，用户须确保建模和分析过程中使用协调的单位制。本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 加载 ANSYS 模板

启动 HyperMesh，选择 Preferences→User Profiles 菜单命令，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 Ansys 单选按钮，单击 OK 按钮，如图 6-4 所示。

STEP 2 读取模型文件

单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\interfaces\ansys\下找到 chapter2_1.hm

文件并打开，模型如图 6-5 所示。

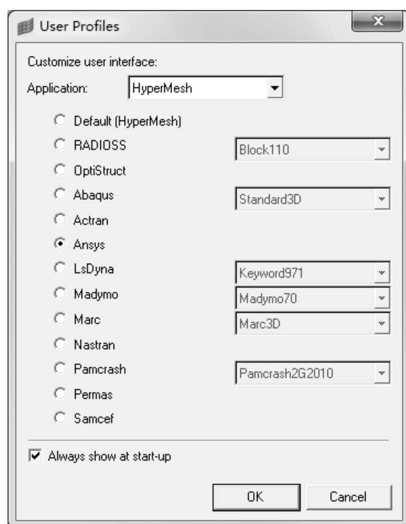


图 6-4　加载 ANSYS 模板

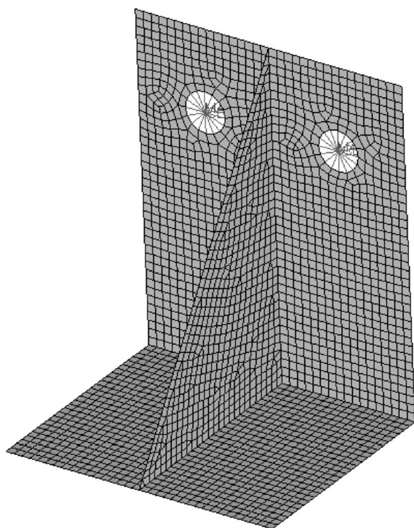


图 6-5　chapter2_1.hm 模型

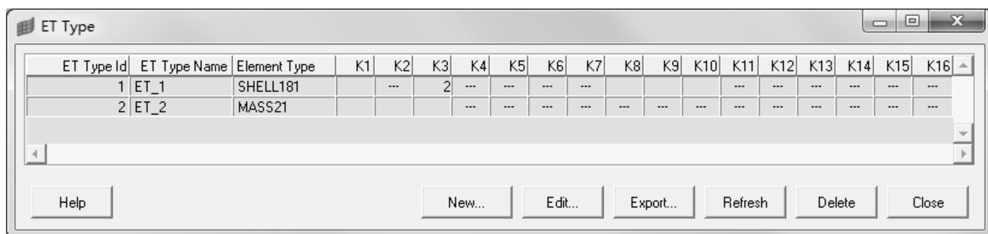
STEP 3 添加单元类型

1）在 Utility 选项卡中，单击 ET Type 按钮，弹出 ET Type 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create ET Type 对话框。从 Element type 下拉列表框中选择 SHELLS→SHELL181 单元。单击 Create/Edit 按钮，勾选 kopt3_FLAG 选项，并设置 kopt3=2，单击 return 按钮，返回 ET Type 对话框。

对于 SHELL181 单元，kopt3=2 表示设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible），即采用非协调模式的完全积分方法，以提高计算精度。

3）再次从 Element type 下拉列表框中选择 MASS→MASS21 单元。单击 Create 按钮，再单击 Close 按钮，退出 Create ET Type 对话框。此时，ET Type 对话框如图 6-6 所示。



ET Type Id	ET Type Name	Element Type	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16
1	ET_1	SHELL181		---	2	---	---	---	---				---	---	---	---	---	---
2	ET_2	MASS21				---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 6-6　ET Type 对话框

4）单击 Close 按钮，退出 ET Type 对话框。

STEP 4 添加实常数

1）在 Utility 选项卡中，单击 Real Sets 按钮，弹出 Real Sets 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Real Sets 对话框。

3）从 Element type 下拉列表框中选择 MASS→MASS21 单元，单击 Create/Edit 按钮，弹出实常数设置卡片。设置 MASSX(1)=0.001，MASSY(2)=0.001，MASSZ(3)=0.001，然后单击

return 按钮，再单击 Close 按钮，退出 Create Real Sets 对话框。此时，Real Sets 对话框如图 6-7 所示。

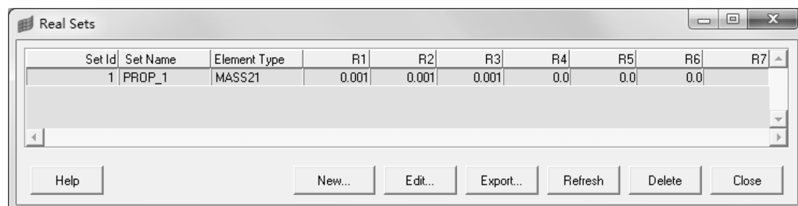


图 6-7　Real Sets 对话框

MASSX(1)、MASSY(2)、MASSZ(3)用于定义 MASS21 单元的质量属性。一般地，质量单元在 3 个平动方向具有相同的质量，须定义所有轴的质量（即使数值相同），由于本例只进行静力分析，因此无须定义质量单元的转动惯量。

4）单击 Close 按钮，退出 Real Sets 对话框。

STEP 5 创建板壳横截面

早期版本的 ANSYS 采用实常数定义板壳的厚度。从 ANSYS 13.0 开始，ANSYS 改用横截面定义板壳的厚度及其余数据。HyperMesh 也可为 ANSYS 创建板壳横截面。

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。

3）将 Section name 改为 Section1，Section type 改为 SHELL。单击 Create/Edit 按钮，弹出板壳横截面设置卡片。设置 PLIES=1，表示单层板壳。设置 TK=10，定义板壳的厚度为 10 个单位。设置 NUMPT(1)=3，定义沿板壳厚度方向的积分点个数为 3，这是 ANSYS 的默认值，如图 6-8 所示。最后单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

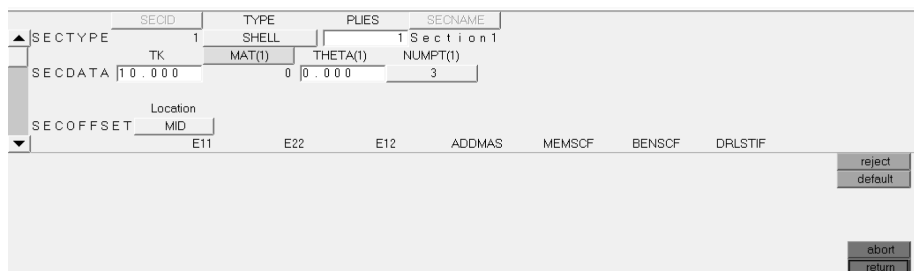


图 6-8　板壳横截面设置卡片

4）重复步骤 3），继续创建厚度为 5 个单位的板壳横截面，命名为 Section2。完成之后，Section 对话框如图 6-9 所示。

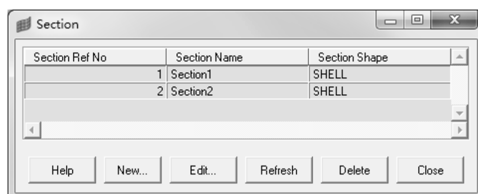


图 6-9　Section 对话框

5）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 6 添加材料属性

1）在 Utility 选项卡中，单击 Material 按钮，弹出 Material 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Material 对话框。将 Name 修改为 Steel；Material type 修改为 MP；Number of temp 修改为 1；在 Material Prop 表格中，选择 EX 下拉列表框，在 C0 栏内输入数值 2.1E5；选择 NUXY 下拉列表框，在 C0 栏内输入数值 0.3，如图 6-10 所示。

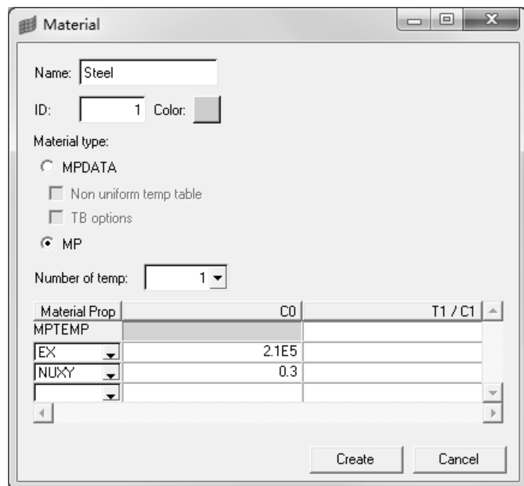


图 6-10 Material 对话框

3）单击 Create 按钮，返回 Material 对话框，如图 6-11 所示。

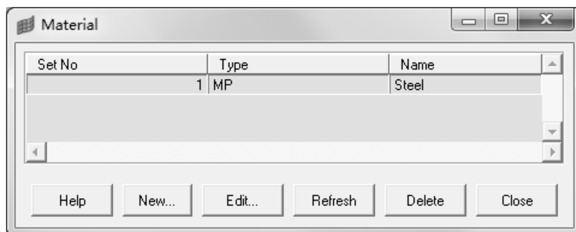


图 6-11 Material 对话框

4）单击 Close 按钮，退出 Material 对话框。

STEP 7 更新组件单元类型

1）在 Utility 选项卡中，单击 Component Manager 按钮，弹出 Components 对话框。

2）执行菜单命令 Table→Editable，使表格处于可编辑状态。

3）在 Assign Values 区域，选择 ET Ref. No.，模型中的所有单元类型将显示出来。

4）单击 Base 组件，使其处于选中状态，确认单元类型为 1-（ET_1）SHELL181，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the ET Ref. No.?”，单击 Yes 按钮，则 Base 组件中的所有单元类型都被指定为 SHELL181。

5）重复步骤 4），将 SHELL181 单元赋给 Rib 组件。

6）单击 mass 栏，使其处于选中状态，将 1-（ET_1）SHELL181 切换为 2-（ET_2）MASS21，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the ET Ref. No.?”，单击 Yes 按钮，则 mass 组件中的所有单元类型都被指定为 MASS21。

STEP 8 更新组件实常数

1）在 Assign Values 区域选择 Real Set No.。

2）单击 mass 组件，使其处于选中状态，在下拉列表中选择 1-（PROP_1）MASS21，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the Real Set. No.?”，单击 Yes 按钮，则 mass 组件中的所有单元实常数都被指定为 PROP_1。

STEP 9 更新组件横截面

1）在 Assign Values 区域选择 Section Set No.。

2）单击 Base 组件，使其处于选中状态，在下拉列表中选择 1-（Section1）SHELL，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the Section Set No.?”，单击 Yes 按钮，则 Base 组件中所有单元的横截面都被指定为 Section1（厚度为 10）。

3）重复步骤 2），将 Section2（厚度为 5）赋给 Rib 组件。

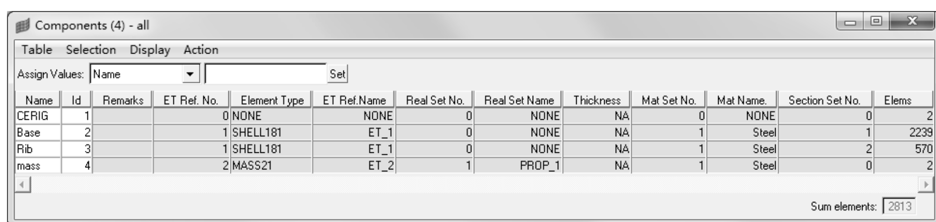
STEP 10 更新组件材料属性

1）在 Assign Values 区域，选择 Mat Set No.，模型中的所有材料属性将被显示出来。

2）按住〈Ctrl〉键，选择 Base、Rib 和 mass 组件，使其处于选中状态。在下拉列表框中选择 1-Steel，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the Mat Set No.”，单击 Yes 按钮，则 Base、Rib 和 mass 组件中的所有单元都被指定为 Steel。

注意：CERIG 组件中定义了刚性区域，由 ANSYS 自动生成约束方程，不需要定义单元类型、实常数、横截面和材料属性。

至此，单元类型、实常数、横截面和材料属性已定义完毕，Components 对话框如图 6-12 所示。确认无误后，关闭 Components 对话框。



Name	Id	Remarks	ET Ref. No.	Element Type	ET Ref.Name	Real Set No.	Real Set Name	Thickness	Mat Set No.	Mat Name.	Section Set No.	Elems
CERIG	1		0	NONE	NONE	0	NONE	NA	0	NONE	0	2
Base	2		1	SHELL181	ET_1	0	NONE	NA	1	Steel	1	2239
Rib	3		1	SHELL181	ET_1	0	NONE	NA	1	Steel	2	570
mass	4		2	MASS21	ET_2	1	PROP_1	NA	1	Steel	0	2

图 6-12　Components 对话框

STEP 11 创建载荷集

1）单击 Load Collectors 按钮，将 loadcol name 设置为 constraints，为组件集指定一种颜色，然后单击 create 按钮，如图 6-13 所示。

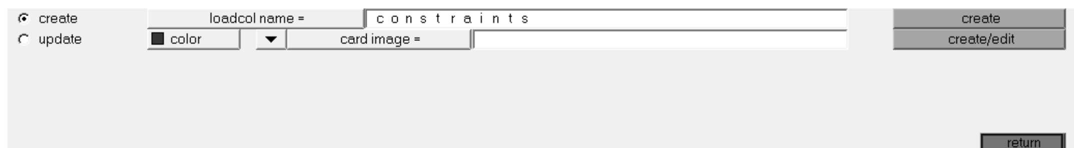


图 6-13　创建 constraints 载荷集

2）重复步骤 1），继续创建名称为 force1、force2 和 force3 的载荷集，之后单击 return 按钮退出面板。

STEP 12 为模型添加自由度约束

1）在 Model 浏览器中展开 Load Collector 文件夹，用鼠标右键单击 constraints，并选择 Make Current 命令，所有新建的约束都将放置于 constraints 载荷集。

2）在 Analysis 页面中选择 constraints 面板。

3）确认选中 dof1～dof6，单击 nodes 按钮，选择 by path，选择模型左边的两个端点，则 HyperMesh 自动选择端点之间的所有节点，然后单击 create 按钮，如图 6-14 所示。



图 6-14　添加自由度约束

4）重复步骤 3），为模型右边添加自由度约束，之后单击 return 按钮退出面板。添加自由度约束之后的模型如图 6-15 所示。

说明：在 HyperMesh 中，dof1、dof2、dof3、dof4、dof5、dof6 分别表示 ANSYS 中的 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ。

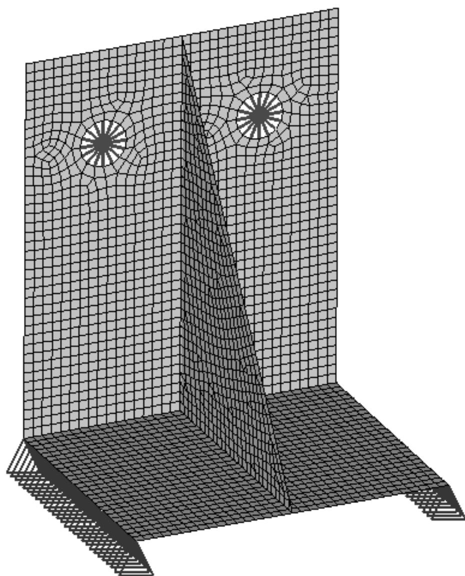


图 6-15　添加自由度约束

STEP 13 施加力载荷 1

1）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击 force1，并选择 Make Current 命令，所有新建的力载荷将放置于 force1 载荷集。

2）在 Analysis 页面中选择 forces 面板。

3）确认 nodes 为默认选项，将 magnitude 设置为 500，加载方向切换为 z-axis，uniform size 设置为 30，如图 6-16 所示。

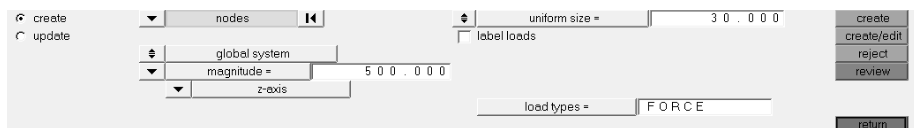


图 6-16　施加力载荷

4）选中两个螺栓孔中间的质量单元，并单击 create 按钮，创建幅值为 500 的力载荷（见图 6-17），之后单击 return 按钮退出面板。

STEP 14 施加力载荷 2

1）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击 force2，并选择 Make Current 命令，所有新创建的力载荷将放置于 force2 载荷集。

2）关闭 force1 载荷集的载荷显示，隐藏之前创建的幅值为 500 的力载荷，如图 6-18 所示。

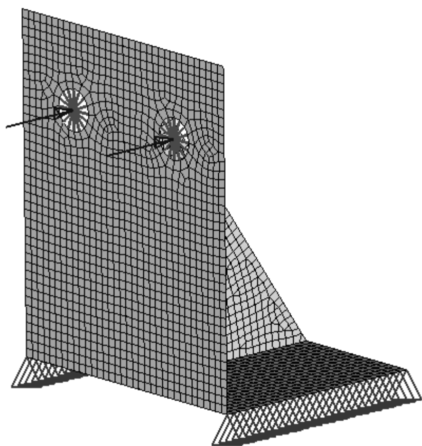


图 6-17　幅值为 500 的力载荷



图 6-18　隐藏力载荷

3）在 Analysis 页面中选择 forces 面板。

4）确认 nodes 为默认选项，将 magnitude 设置为 500，加载方向切换为 z-axis，uniform size 设置为 30。

5）单击 xy Top Plane View 按钮，选中左边螺栓孔中间的质量单元，并单击 create 按钮，创建幅值为 500 的力载荷。

6）将 magnitude 设置为-500，选中右边螺栓孔中间的质量单元，并单击 create 按钮，创建另一载荷（见图 6-19）。

STEP 15 施加力载荷 3

1）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击 force3，并选择 Make Current 命令，所有新建的力载荷将放置于 force3 载荷集。

2）关闭 force1 和 force2 载荷集的载荷显示。

3）在 Analysis 页面中选择 forces 面板。

4）确认 nodes 为默认选项，将 magnitude 设置为-500，加载方向切换为 z-axis，uniform size 设置为 30。

5）选中两个螺栓孔中间的质量单元，并单击 create 按钮，创建力载荷（见图 6-20），之后单击 return 按钮退出面板。

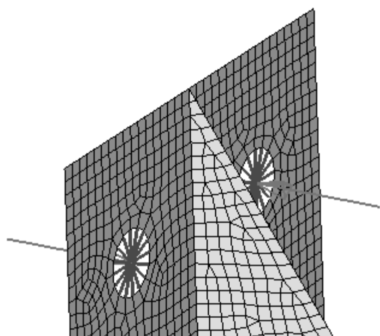


图 6-19　方向相反的力载荷

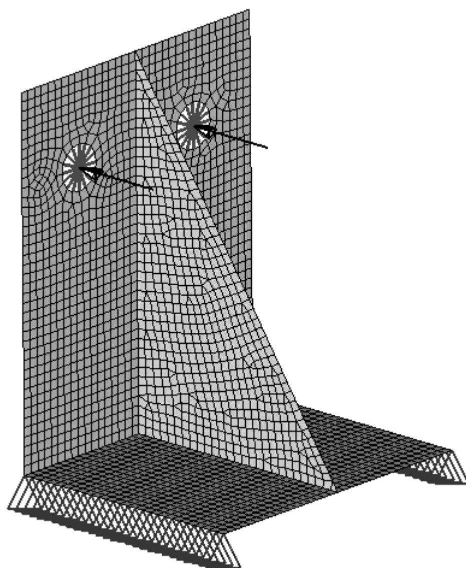


图 6-20　幅值为-500 的力载荷

STEP 16 创建多载荷步

1）在 Analysis 页面中选择 load steps 面板。

2）设置 name 为 Step1，单击 loadcols，选择 constraints 和 force1 载荷集，单击 select 按钮，然后单击 create 按钮。

3）设置 name 为 Step2，单击 loadcols，选择 constraints 和 force2 载荷集，单击 select 按钮，然后单击 create 按钮。

4）设置 name 为 Step3，单击 loadcols，选择 constraints 和 force3 载荷集，单击 select 按钮，然后单击 create 按钮。

5）单击 return 按钮，退出 load steps 面板。

STEP 17 添加求解控制卡片

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 next 按钮，切换到下一个页面，再单击 LSSOLVE 按钮，设置最小的载荷步 LSMIN 为 1，最大的载荷步 LSMAX 为 3，载荷步增量 LSINC 为 1，之后单击 return 按钮两次，退出 control cards 面板。

本步骤添加了两项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
LSSOLVE,1,3,1
```

STEP 18 保存模型

执行菜单命令 File→Save As，弹出 Save Model As 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-1.hm，单击“保存”按钮。

STEP 19 导出 ANSYS 模型文件

1）开启 force1 和 force2 载荷集的载荷显示。

2）单击 Export Solver Deck 按钮，打开 Export 标签。

3）确认选中 Export Solver Deck 按钮，将 Export 设置为 All，导出所有数据，单击 Select file 按钮，弹出 Select ANSYS file 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-1.cdb，单击“保存”按钮，返回 Export 标签，单击 Export 按钮生成 Exercise6-1.cdb 文件，如图 6-21 所示。

STEP 20 结果后处理

HyperMesh 设置好所有求解选项后，ANSYS 可直接打开 Exercise6-1.cdb 文件并自动求解所有载荷步。图 6-22～图 6-24 为各载荷步的 von Mises 应力云图。

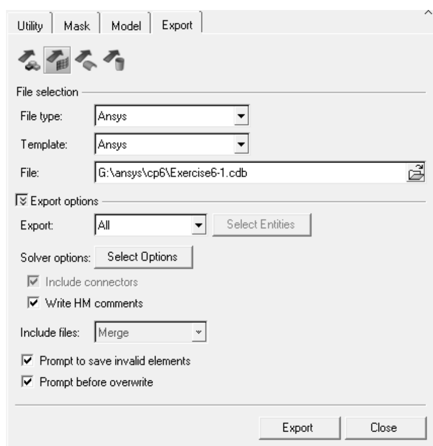


图 6-21 导出 ANSYS 模型文件

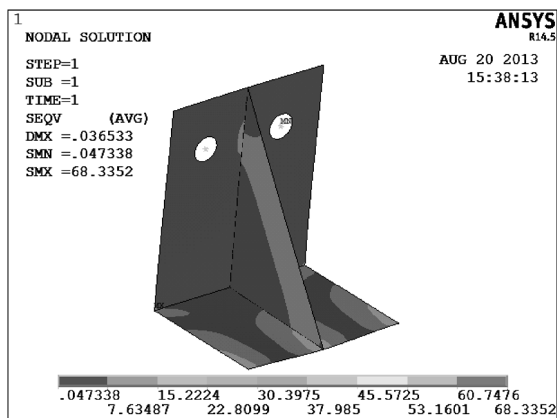


图 6-22 第一载荷步的 von Mises 应力云图

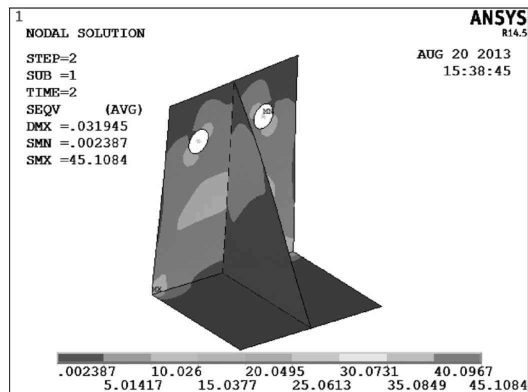


图 6-23 第二载荷步的 von Mises 应力云图

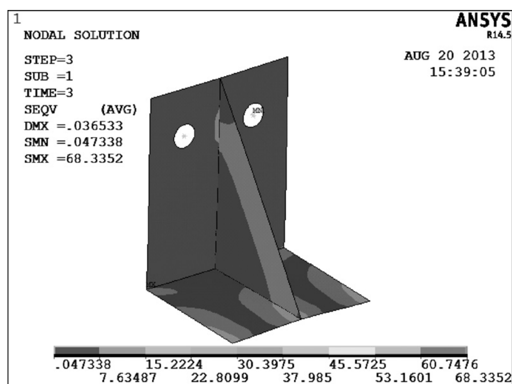


图 6-24 第三载荷步的 von Mises 应力云图

6.3 实例：利用 HyperMesh 为 Workbench Mechanical 进行前处理



Mechanical 是 ANSYS 公司推出的新一代机械分析软件，包含结构分析、热分析及电磁分析模块，已集成到 Workbench 平台。利用 HyperMesh 为 Workbench Mechanical 进行前处理时应注意以下几点：

1）Workbench Mechanical 的自动化程度较高，只需将 HyperMesh 创建的网格导入 Workbench，其余操作可由 Mechanical 完成。

2）Workbench 提供了有限元网格导入模块 Finite Element Modeler，可导入不同求解器格式的网格文件，这些网格文件包括 ABAQUS 的.INP 文件、ANSYS 的.CDB 文件、NASTRAN 的.BDF 文件等。

3）基于不同的求解器模板，HyperMesh 可以创建不同的输出文件，如 ABAQUS 的.INP 文件和 NASTRAN 的.BDF 文件，再直接导入 Finite Element Modeler。但应注意，对于 ANSYS 14.5，Finite Element Modeler 只能导入 Mechanical APDL 输出的.CDB 文件，而不能直接导入 HyperMesh 输出的.CDB 文件。

4）对于 ANSYS 14.5，经 Finite Element Modeler 导入的网格，只有实体和板壳单元可以用于后续的结构分析。

5）即使 Finite Element Modeler 导入了载荷和边界条件，也不能应用于后续的结构分析，只能在 Mechanical 程序中重新定义。

下面将讲解利用 HyperMesh 为 ANSYS Workbench Mechanical 进行前处理的实例。在本例中，将第 6.2 节的网格导入 Workbench，再进行后续的应力分析，并与 Mechanical APDL 的计算结果进行对比。

STEP 1 准备.CDB 文件

由于 Finite Element Modeler 不能直接导入 HyperMesh 输出的.CDB 文件，所以需要利用 Mechanical APDL 进行中转。

将 HyperMesh 输出的文件 Exercise6-1.cdb 导入 Mechanical APDL，通过 GUI 方式的 Main Menu→Preprocessor→Archive Model→Write 打开 Write Geometry/Loads for Archiving 对话框，将 Archive file 设置为 Exercise6-2-APDL.cdb，IGES file 设置为 Exercise6-2-APDL.iges，单击 OK 按钮，如图 6-25 所示。在 ANSYS 的工作目录下生成了两个文件：Exercise6-2-APDL.cdb 是有限元模型文件，用于后续的结构分析；Exercise6-2-APDL.iges 是几何文件，后续不再使用。

说明：如果读者熟悉 ABAQUS 或 NASTRAN，可以采用 HyperMesh 创建相应求解器的输出文件，它们可以直接导入 Finite Element Modeler。

STEP 2 定义 Workbench 分析系统

1）启动 Workbench，在组件系统（Component Systems）中双击 Finite Element Modeler，在分析系统（Analysis Systems）中双击 Static Structural。

2）利用鼠标拖曳的方式连接 Finite Element Modeler 和 Static Structural，如图 6-26 所示。

Static Structural 可以共享 Finite Element Modeler 的材料和有限元模型。

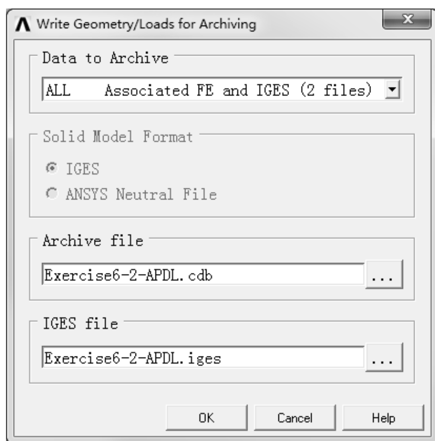


图 6-25　Write Geometry/Loads for Archiving 对话框

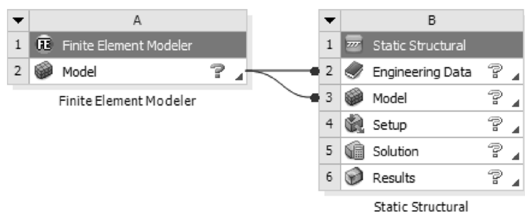


图 6-26　连接结构静力分析系统

STEP 3 导入有限元模型文件

1）用鼠标右键单击 Finite Element Modeler 的 Model 单元格 A2，在弹出的菜单中选择 Add Input Mesh→Browse 命令，找到文件 Exercise6-2-APDL.cdb 并打开，单元格 A2 出现绿色的 Refresh 图标 。

2）双击单元格 A2，启动 Finite Element Modeler 程序，程序将自动导入有限元模型，如图 6-27 所示。

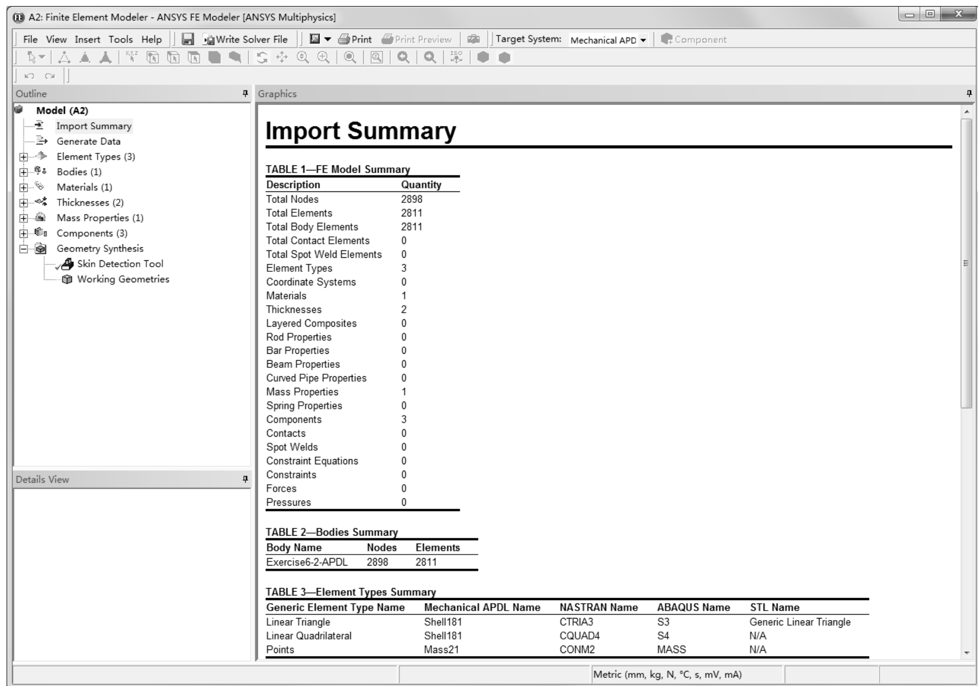


图 6-27　Finite Element Modeler 程序-Import Summary

由图 6-27 可知，Finite Element Modeler 程序导入了 2811 个单元（Total Elements），2898 个节点（Total Nodes），3 种单元类型（Element Types），一种材料（Materials），两种厚度（Thicknesses），一种质量属性（Mass Properties），3 个组件（Components）。Finite Element Modeler 程序窗口的最下方提示了所用的单位制为 mm、kg、N、℃、s、mV、mA。

3）单击 Outline 中的“Element Types（3）”可以预览导入的网格，如图 6-28 所示。板壳单元按真实的厚度显示，四边形和三角形网格按不同的颜色显示。确认无误之后，直接关闭 Finite Element Modeler 程序窗口。

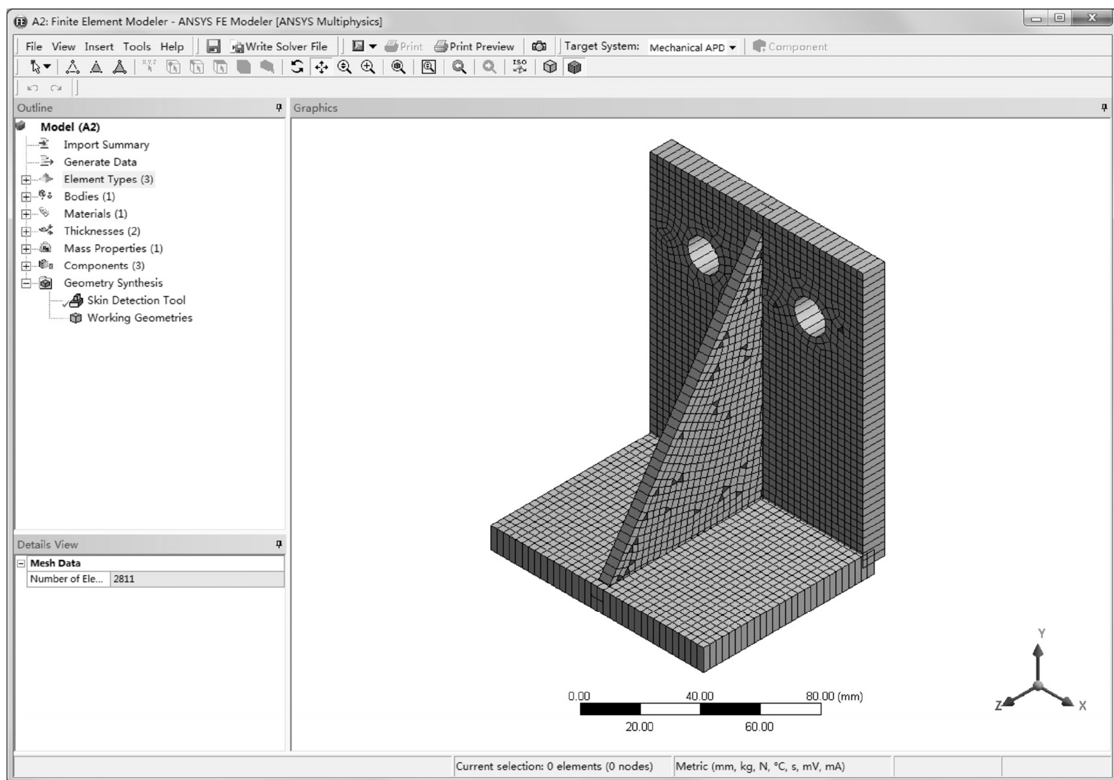


图 6-28 Finite Element Modeler 程序-Element Types

4）此时，单元格 A2 出现黄色的 Update 图标，用鼠标右键单击单元格 A2，在弹出的菜单中选择 Update 命令完成更新。之后，A2 单元格出现绿色的完成图标，而单元格 B2 和 B3 出现绿色的 Refresh 图标，表示成功导入了有限元模型。

注意：由于 HyperMesh 与 Workbench 采用的单位制可能不同，因此应检查有限元模型的几何尺寸是否一致，必要时进行修正。对于本例，HyperMesh 与 Workbench 均采用 mm 单位，有限元模型不存在问题。

STEP 4 检查材料属性

1）双击单元格 B2（Engineering Data），弹出对话框提示“Upstream data has been modified since it was last read. Would you like to read the upstream data?”，单击“是（Y）”按钮，读入 Finite Element Modeler 导入的材料属性。

2）当前有两种材料，即 Structural Steel 和 Unnamed，其中 Structural Steel 是 Workbench Mechanical 默认的材料，Unnamed 是 Finite Element Modeler 导入的材料。检查 Unnamed 的材料属性，确认杨氏模量（Young’s Modulus）为 2.1E+11Pa，泊松比（Poisson’s Ratio）为 0.3，之后单击 Return to Project 按钮，返回 Workbench 工作界面。此时，单元格 B2 出现绿色的完成图标 ✓ 。

注意：由于 HyperMesh 与 Workbench 采用的单位制可能不同，应检查 Workbench 中的材料属性是否正确，必要时进行修改。对于本例，Workbench 正确识别了杨氏模量和泊松比，无需做任何更改。

STEP 5 启动 Mechanical 程序

1）双击单元格 B3（Model），启动 Mechanical 程序，如图 6-29 所示。Finite Element Modeler 根据有限元模型重构几何模型，并传递给 Mechanical 程序。

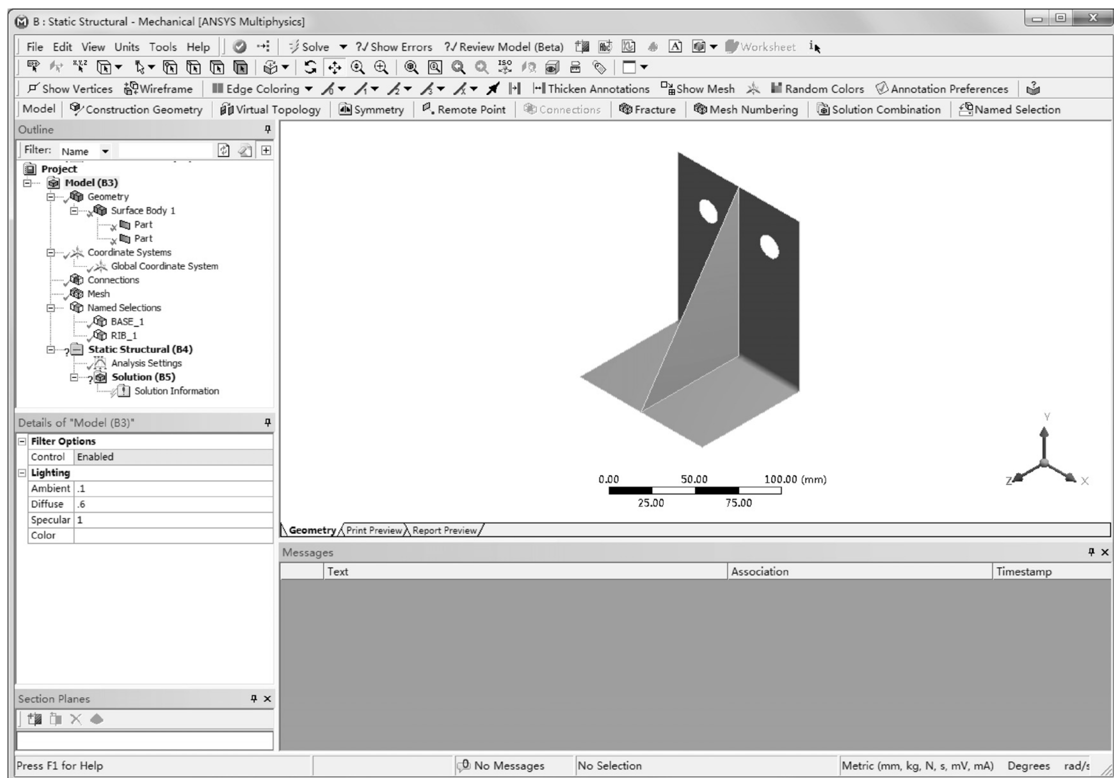


图 6-29　Mechanical 程序

2）仔细检查模型树，发现只有两个面体组件（Surface Body），而质量单元并没有导入 Mechanical 程序。检查第一个面体 Part，确认单元厚度为 5mm，材料为 Unnamed。检查第二个面体 Part，确认单元厚度为 10mm，材料为 Unnamed，如图 6-30 和图 6-31 所示。

3）选中模型树中的 Mesh，检查有限元网格，发现 Finite Element Modeler 的网格已正确导入 Mechanical 程序。

说明：①对于 ANSYS 14.5，经 Finite Element Modeler 导入的网格，只有实体和板壳单元可以用于后续的结构分析。

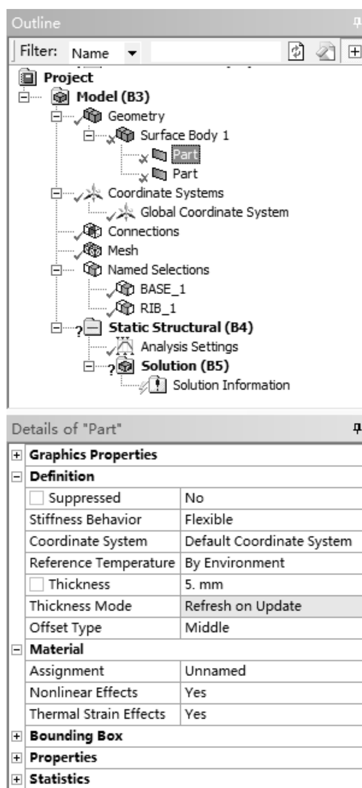


图 6-30　检查第一个面体 Part

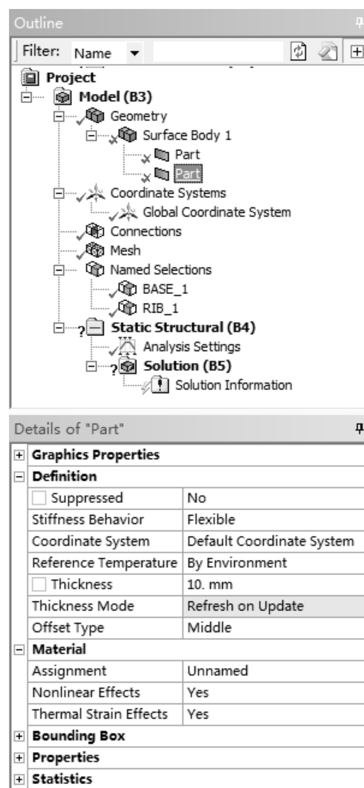


图 6-31　检查第二个面体 Part

② 即使 Finite Element Modeler 导入了载荷和边界条件，也不能应用于后续的结构分析，只能在 Mechanical 程序中重新定义。

③ Mechanical 自动选择单元并设置优化的单元选项，用户无需手动修改，详见第 2 章（ANSYS 高级单元技术）。对于高级用户，可以通过插入命令流的方式，强制指定单元和单元选项。对于本例，Mechanical 将选择板壳单元 SHELL181，并设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible）和 K8=2（All layers + Middle）。用户可以为几何插入命令流（Commands）强制指定单元和单元选项。例如，可以用如下命令流指定第一个面体 Part 使用板壳单元 SHELL181，且设置单元选项 K3=2。

```
ET,MATID,SHELL181          !Defines element type SHELL181 from the element library
KEYOPT,MATID,3,2           !Sets element key optionK3=2
```

STEP 6 设置求解控制选项

选择模型树中的 Analysis Settings，在 Details of “Analysis Settings”窗口中，设置 Number of Steps=3，Weak Springs 为 Off，Large Deflection 为 Off，其余选项如图 6-32 所示。这里设置了 3 个载荷步，关闭了弱弹簧效应和大变形效应。

STEP 7 添加自由度约束

1）用鼠标右键单击模型树中的 Static Structural(B4)，在弹出的菜单中选择 Insert→Fixed Support 命令。

2）激活边线选择按钮，按住〈Ctrl〉键，选中图 6-33 中的两条边线，单击 Details of

“Fixed Support”窗口中的 Apply 按钮。

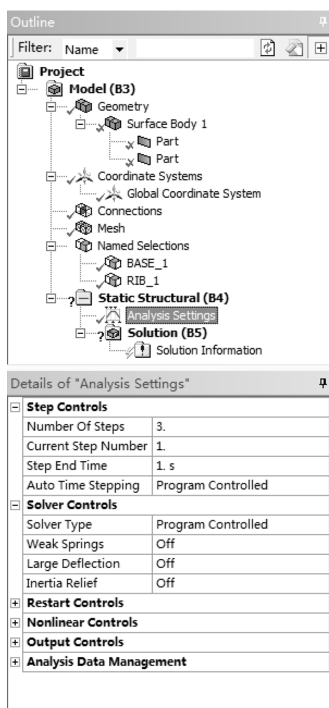


图 6-32　设置求解控制选项

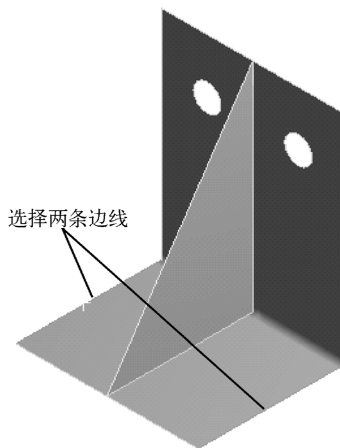


图 6-33　添加自由度约束

STEP 8 施加力载荷

1）用鼠标右键单击模型树中的 Static Structural(B4)，在弹出的菜单中选择 Insert→Remote Force 命令。

2）选中图 6-33 中左端的螺栓孔，单击 Details of“Remote Force”窗口中的 Apply 按钮。将 Define By 设置为 Components，Z component=500N，Behavior 设置为 Rigid。在 Graph 窗口中，用鼠标右键单击载荷步 3 中的空白区域，在弹出的菜单中选择“Activate/Deactivate at this step!”命令，在载荷步 3 中隐含远端力，如图 6-34 所示。

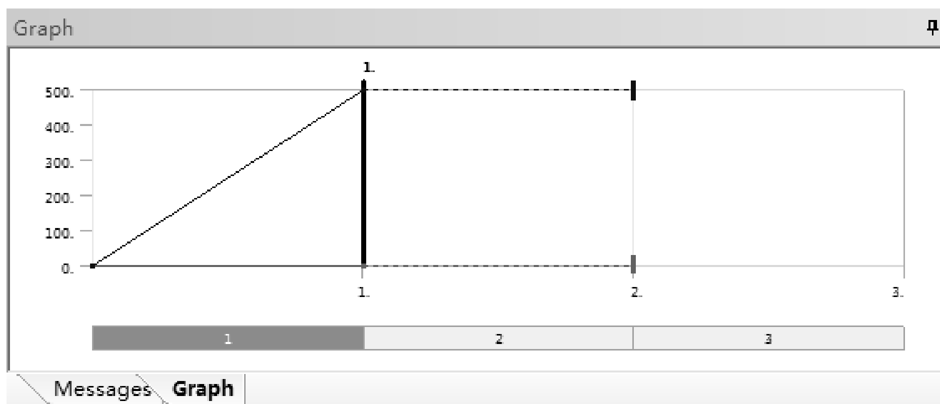


图 6-34　控制远端力在载荷步中的使用

Mechanical 中的远端力 Remote Force 即是 Mechanical APDL 中的 Surface-Based Constraints，通过设置其行为 Behavior 为 Rigid，表示刚性面约束 Rigid Surface Constraint，详见第 4.1.3 节。

3）重复步骤 1）和 2），添加作用于图 6-33 中左端螺栓孔的远端力，作用方向为-Z 方向，大小为 500N，Behavior 为 Rigid，且只作用于载荷步 3。

4）重复步骤 1）和 2），添加作用于图 6-33 中右端螺栓孔的远端力，作用方向为 Z 方向，大小为 500N，Behavior 为 Rigid，且只作用于载荷步 1。

5）重复步骤 1）和 2），添加作用于图 6-33 中右端螺栓孔的远端力，作用方向为-Z 方向，大小为 500N，Behavior 为 Rigid，且只作用于载荷步 2 和载荷步 3。

STEP 9 添加应力结果

1）用鼠标右键单击模型树中的 Solution(B5)，在弹出的菜单中选择 Insert→Stress→Equivalent（von-Mises）命令。在 Details of“Equivalent Stress”窗口中，设置 Display Time 为 1s。

2）重复步骤 1），继续添加两项应力结果，将 Display Time 分别设置为 2s 和 3s。

STEP 10 求解

单击求解按钮 Solve，提交计算。

STEP 11 结果后处理

图 6-35～图 6-37 为各载荷步的 von Mises 应力云图。与图 6-22～图 6-24 对比发现，Mechanical 显示的应力值偏小，这是由于 Mechanical 与 Mechanical APDL 的后处理采用了不同的应力平均模式。

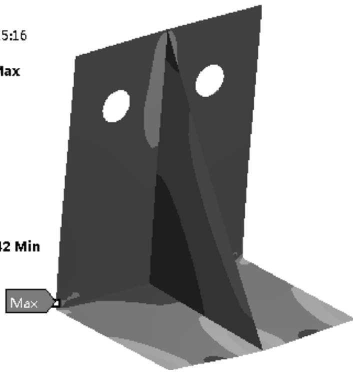


图 6-35　第一载荷步的 von Mises 应力云图

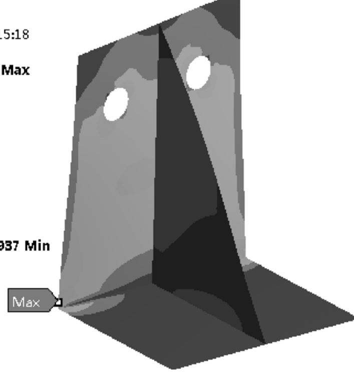


图 6-36　第二载荷步的 von Mises 应力云图

有限元法一般以节点位移为基本变量，由 ANSYS 求得的位移解在全域是连续的，应变和应力解在单元内部是连续的，而在单元间一般是不连续的，即在单元边界上发生突变。因此，同一个节点，由围绕它的不同单元计算得到的应变和应力值通常是不同的。在实际工程中，我们感兴趣的通常是单元边缘和节点上的应力。因此，须对计算得到的应力进行处理，以改善所得到的结果。

ANSYS 在单元积分点求得应变和应力，再外推到单元节点处。默认情况下，Mechanical APDL 采用 PowerGraphics 方式显示结果，而 Mechanical 采用 Full 方式显示结果。对于

PowerGraphics 方式，只有模型外表面的单元和结果用于平均和显示。对于 Full 方式，所有单元和结果（内部和表面的）都用于平均和显示。

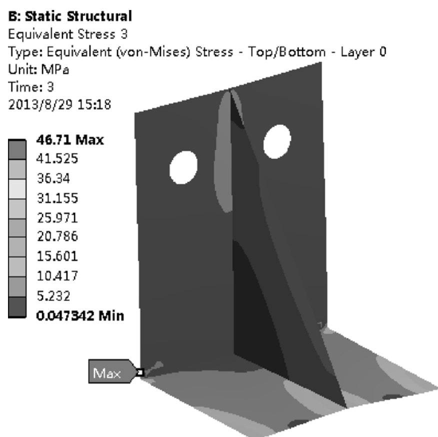


图 6-37　第三载荷步的 von Mises 应力云图

一般认为，PowerGraphics 方式是一种保守的方法，会产生较大的应力，可得到偏安全的设计方案。这是因为表面总会产生较大的应力，而 PowerGraphics 方式不对模型内部的单元结果进行平均。除此之外，PowerGraphics 方式在几何不连续处不进行平均处理，会得到较为真实的图形显示。

对于 Mechanical，用户可以为后处理插入命令流（Commands），强制采用 PowerGraphics 方式进行后处理。例如，可以用如下命令显示载荷步 1 的 von Mises 应力云图。表 6-1 列出了 Mechanical 与 Mechanical APDL 计算的应力对比数据，从可知两者计算结果非常接近。

```
/SHOW,PNG                ! Creates PNG file
/GRAPHICS,POWER          ! ActivatesPowerGraphics
SET,1                    ! Defines the data set 1 to be read from the results file
PLNSOL,S,EQV,0,1         ! Displays von Misesstress as continuous contour
```

表 6-1　Mechanical 与 Mechanical APDL 计算的应力对比

（单位：MPa）

求　解　器	显 示 方 式	载荷步 1	载荷步 2	载荷步 3
Mechanical APDL	PowerGraphics	68.34	45.11	68.34
	Full	46.71	30.79	46.71
Mechanical	PowerGraphics	68.33	45.11	68.33
	Full	46.71	30.79	46.71

6.4　实例：HyperMesh 接触向导

本实例讲解利用 HyperMesh 接触向导为 ANSYS 创建面-面接触对，利用 HyperMesh 为 ANSYS 设置非线性求解控制参数，并导入 ANSYS 进行静力分析。

本实例的模型包含两个组件：一个代表接触体，另一个代表目标体。CONTA171 单元覆盖于接触体表面，TARGE169 单元覆盖于目标体表面，它们都属于 2-d 单元，通过共享实常数号形成接触对。当 TARGE169 单元穿透 CONTA171 单元时，即发生接触行为。

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 加载 ANSYS 模板

启动 HyperMesh，选择菜单中的 Preferences→User Profiles 命令，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 ANSYS，单击 OK 按钮。

STEP 2 读取模型文件

单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\interfaces\ansys\下找到 chapter2_3.hm 文件并打开，模型如图 6-38 所示。

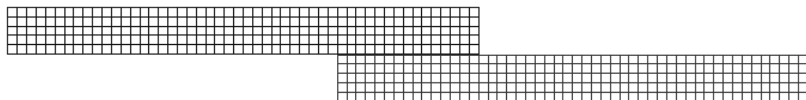


图 6-38　chapter2_3.hm 模型

STEP 3 调整单元法向

1）在 Tool 页面中选择 normals 面板，如图 6-39 所示。

2）选择 contact 组件和 target 组件，并单击 reverse normals 按钮，将所有单元的法向反向。

注意：为了使后续创建的接触对法向相对，需要在此调整单元法向，此步骤不能省略。

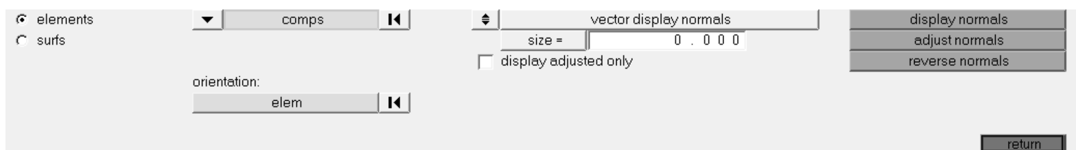


图 6-39　normals 面板

STEP 4 启动 ANSYS 接触向导

利用 HyperMesh Utility 选项卡中的 Contact Manager 工具进入接触向导，如图 6-40 所示。

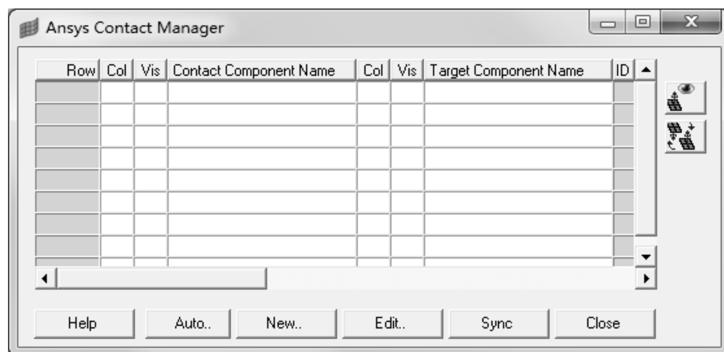


图 6-40　ANSYS 接触向导

STEP 5 创建新的二维接触对

单击 New 按钮，弹出 Create New Contact Pair 对话框，将 Creation method 设置为 Flexible，Contact type 设置为 2D，Create from 设置为 Surface to surface，Symmetric Contact 设置为 No，如图 6-41 所示。

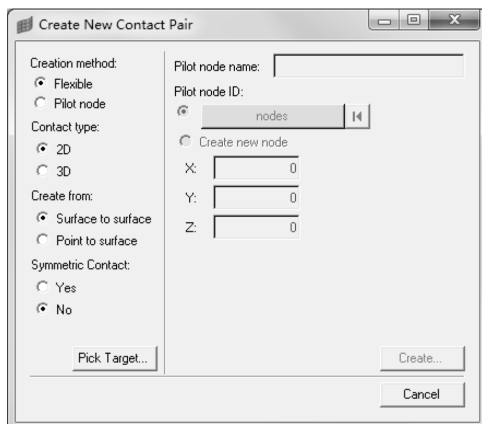


图 6-41　Create New Contact Pair 对话框

STEP 6 选择目标单元组件

单击 Pick Target 按钮，选择 target 组件集（红色单元），单击 proceed 按钮，弹出 Target Elements Selection 对话框，如图 6-42 所示。

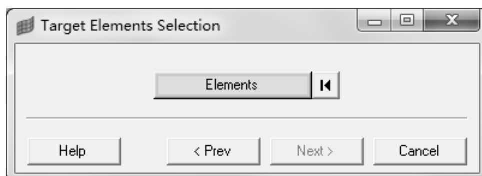


图 6-42　Target Elements Selection 对话框 1

STEP 7 选择目标单元

1）在 Target Elements Selection 对话框中，单击 Elements 按钮，激活目标单元选择面板。

2）按住〈Shift〉键，用鼠标左键框选图 6-43 所示的单元。单击 proceed 按钮，返回 Target Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。

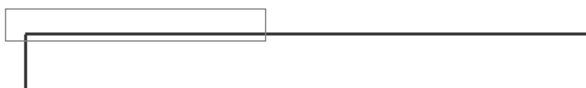


图 6-43　选择目标单元

STEP 8 定义目标单元组件属性

1）单击 Next 按钮，弹出 Target Component Details 对话框，保持所有默认选项，如图 6-44 所示。

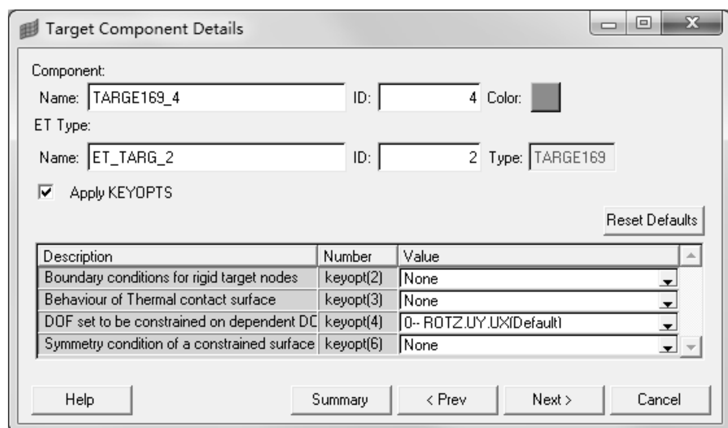


图 6-44 Target Component Details 对话框 2

说明：Target Component Details 对话框用于定义目标单元选项。对于本例，目标单元使用 TARGE169，可采用默认的单元选项，即保持默认值。

2）单击 Next 按钮之后，弹出 Contact Components Selection 对话框，如图 6-45 所示。

STEP 9 选择接触单元组件

在 Contact Components Selection 对话框中，单击 Components 按钮，选择 contact 组件集（蓝色单元），单击 proceed 按钮，返回 Contact Components Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。单击 Next 按钮，弹出 Contact Elements Selection 对话框，如图 6-46 所示。

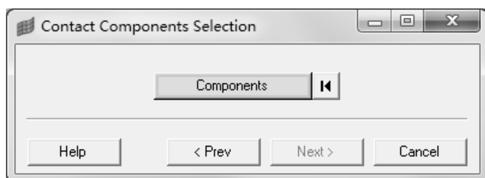


图 6-45 Contact Components Selection 对话框 1

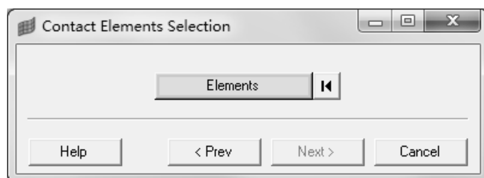


图 6-46 Contact Elements Selection 对话框 2

STEP 10 选择接触单元

1）在 Contact Elements Selection 对话框中，单击 Elements 按钮，激活接触单元选择面板。

2）按住〈Shift〉键，用鼠标左键框选图 6-47 所示的单元。

3）单击 proceed 按钮，返回 Contact Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。



图 6-47 选择接触单元

STEP 11 定义接触单元组件属性

1）单击 Next 按钮，弹出 Contact Component Details 对话框。设置 keyopt(5)=1，忽略接触对的初始间隙；keyopt(9)=1，忽略接触对的初始穿透；keyopt(10)=2，允许 ANSYS 自动更新接触刚度，如图 6-48 所示。

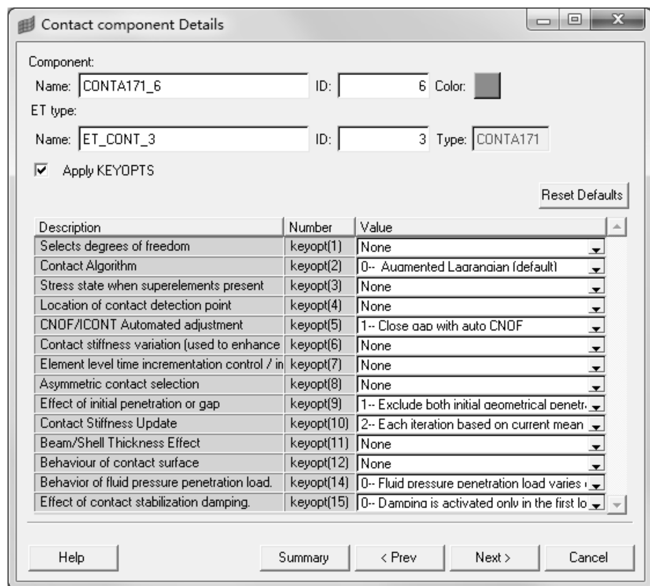


图 6-48　Contact Component Details 对话框 3

说明：Contact Component Details 对话框用于定义接触单元选项。对于本例，接触单元使用 CONTA171，可按图 6-48 所示设置单元选项，以增强 ANSYS 求解的收敛性。

2）单击 Next 按钮之后，显示如图 6-49 所示的完整模型。同时，弹出 Contact Property 对话框，如图 6-50 所示。

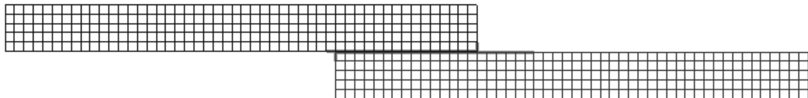


图 6-49　完整模型（含一对接触对）

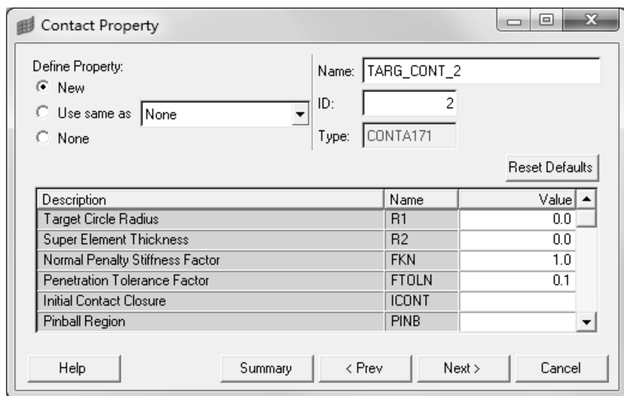


图 6-50　Contact Property 对话框

STEP 12 定义接触属性

在 ANSYS 中，接触属性是指实常数。对于本例，保持所有默认值即可，如图 6-50 所示。

STEP 13 定义接触材料

在 Contact Property 对话框中，单击 Next 按钮，弹出 Contact Material 对话框。定义一种新的接触材料，将摩擦系数 MU 设置为 0.45，如图 6-51 所示。

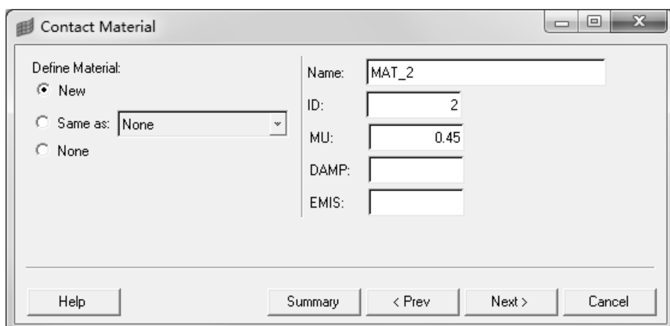


图 6-51 Contact Material 对话框

STEP 14 查看接触对汇总

1）在 Contact Material 对话框中，单击 Next 按钮，弹出 Ansys Contact Manager 对话框，如图 6-52 所示。

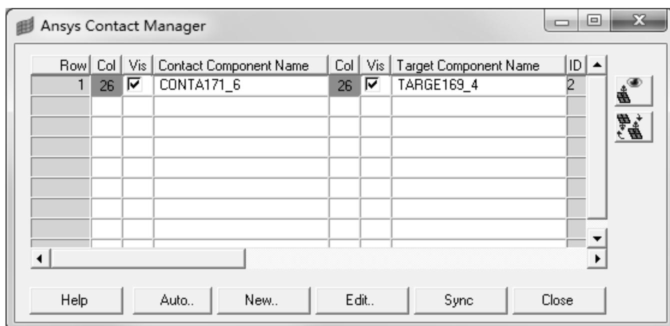


图 6-52 Ansys Contact Manager 对话框

2）单击 Close 按钮，退出 Ansys Contact Manager 对话框，完成接触对的创建。

STEP 15 创建载荷集

单击 Load Collectors 按钮，将 loadcol name 设置为 constraints，为组件集指定一种颜色，然后单击 create 按钮，如图 6-53 所示。

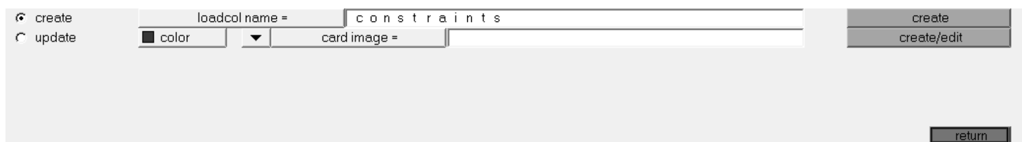


图 6-53 创建 constraints 载荷集

STEP 16 为模型添加自由度约束

1）在 Analysis 页面中选择 constraints 面板。

2）确认选中 dof1~dof6，即约束所有自由度，并设置 size=2，如图 6-54 所示。

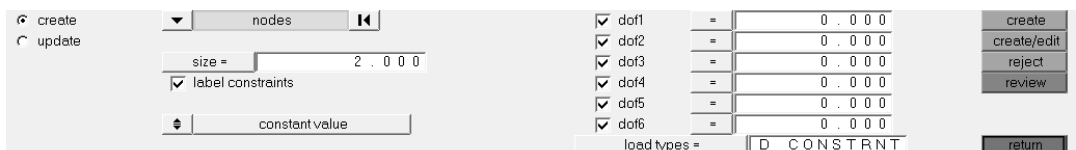


图 6-54　添加自由度约束

3）选择接触体左端节点和目标体右端节点，并单击 create 按钮，则为模型添加了自由度约束，如图 6-55 所示。

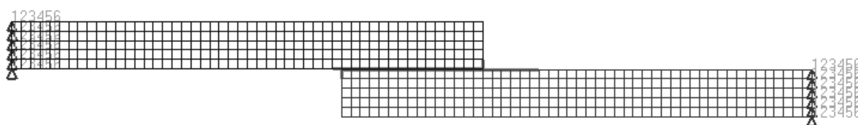


图 6-55　带自由度约束的模型

STEP 17 施加位移载荷

1）只选中 dof2，并设置 dof2=-2，即指定 *Y* 方向位移为-2，如图 6-56 所示。



图 6-56　添加自由度约束

2）选择接触体右端中部的两个节点，如图 6-57 所示。

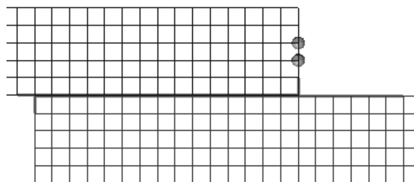


图 6-57　选择节点

3）单击 create 按钮，则为模型施加了位移载荷。

4）单击 return 按钮，退出 constraints 面板。

STEP 18 设置非线性求解控制卡片

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，然后单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 6-58），STATIC 表示进行静力分析。单击

return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 LNSRCH 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 6-59），表示为 Newton-Raphson 算法激活线性搜索。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 6-60），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 6-58　ANTYPE 命令



图 6-59　LNSRCH 命令

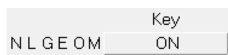


图 6-60　NLGEOM 命令

6）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 100，表示初始载荷子步为 100；将 NSBMX 设置为 1000，表示最大载荷子步为 1000；将 NSBMN 设置为 20，表示最小载荷子步为 20（见图 6-61）。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 6-61　NSUBST 命令

7）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

8）当前的控制卡片如图 6-62 和图 6-63 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 6-62　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 6-63　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 6 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
LNSRCH,ON
NLGEOM,ON
NSUBST,100,1000,20,OFF
SOLVE
```

STEP 19 保存模型

执行菜单命令 File→Save As，弹出 Save Model As 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-3.hm，单击“保存”按钮。

STEP 20 导出 ANSYS 模型文件

1）单击 Export Solver Deck 按钮，打开 Export 标签。

2）确认选中 Export Solver Deck 按钮，将 Export 设置为 All，导出所有数据，单击 Select file 按钮，弹出 Select ANSYS file 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-3.cdb，单击“保存”按钮，返回 Export 标签，单击 Export 按钮生成 Exercise6-3.cdb 文件，如图 6-64 所示。

STEP 21 结果后处理

HyperMesh 设置所有求解选项后，ANSYS 可直接打开 Exercise6-3.cdb 文件并自动求解。图 6-65 为模型的 von Mises 应力云图。

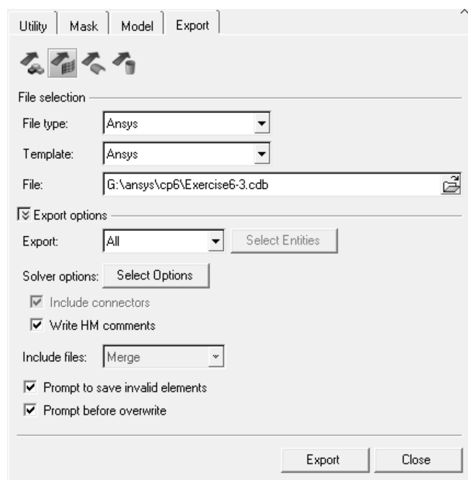


图 6-64　导出 ANSYS 模型文件

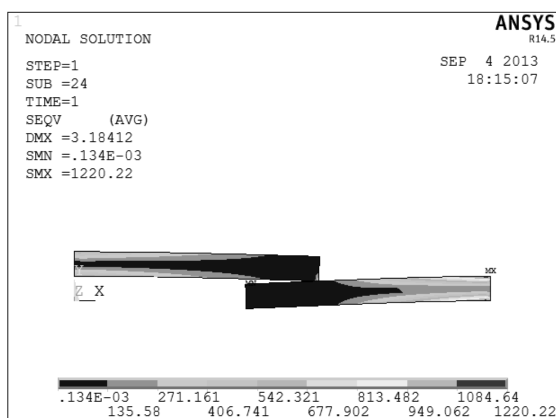


图 6-65　von Mises 应力云图

6.5　实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建二维接触模型

本实例讲解利用 HyperMesh 接触向导为 ANSYS 创建二维面-面接触对，利用 HyperMesh 为 ANSYS 设置非线性求解控制参数，并导入 ANSYS 进行静力分析。

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 加载 ANSYS 模板

启动 HyperMesh，执行菜单命令 Preferences→User Profiles，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 ANSYS，单击 OK 按钮。

STEP 2 读取模型文件

单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\interfaces\ansys\ 下找到

hm-ansys_contact_manager_2-d_tutorial.hm 文件并打开，模型如图 6-66 所示。

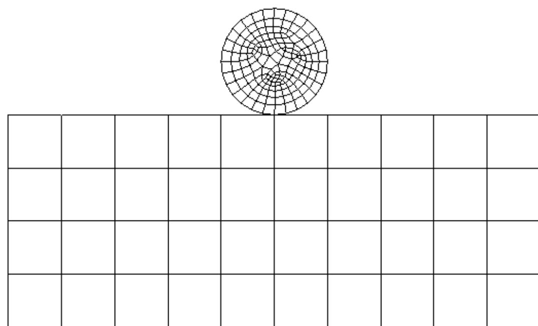


图 6-66　hm-ansys_contact_manager_2-d_tutorial.hm 模型

STEP 3 启动 ANSYS 接触向导

利用 HyperMesh Utility 选项卡中的 Contact Manager 工具进入接触向导，如图 6-67 所示。

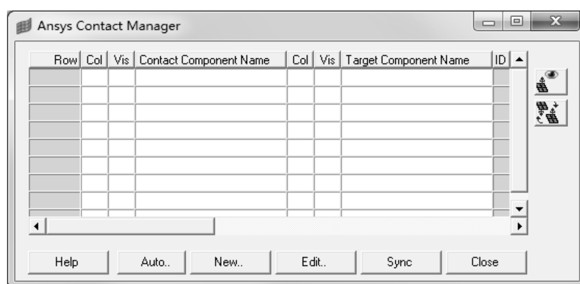


图 6-67　ANSYS 接触向导

STEP 4 创建新的二维接触对

单击 New 按钮，弹出 Create New Contact Pair 对话框，将 Creation method 设置为 Flexible，Contact type 设置为 2D，Create from 设置为 Surface to surface，Symmetric Contact 设置为 No，如图 6-68 所示。

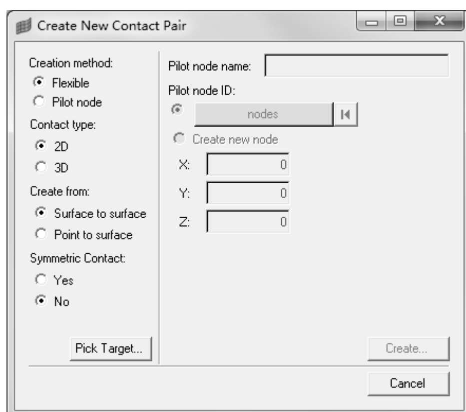
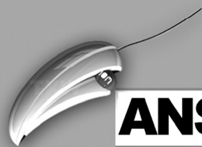


图 6-68　Create New Contact Pair 对话框



STEP 5 选择目标单元组件

单击 Pick Target 按钮，选择 BOX_42 组件集，单击 proceed 按钮，弹出 Target Elements Selection 对话框，如图 6-69 所示。

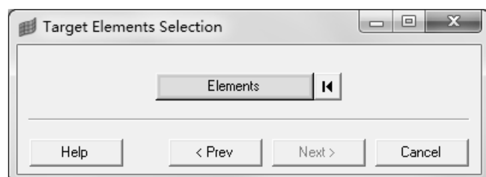


图 6-69　Target Elements Selection 对话框

STEP 6 选择目标单元

1）在 Target Elements Selection 对话框中，单击 Elements 按钮，激活目标单元选择面板。

2）按住〈Shift〉键，用鼠标左键框选图 6-70 所示的单元。单击 proceed 按钮，返回 Target Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。

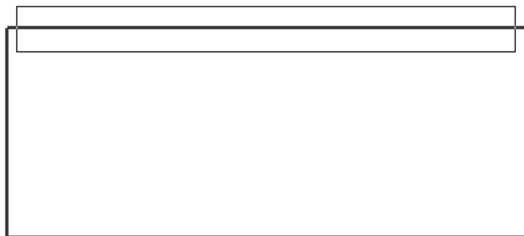


图 6-70　选择目标单元

注意：为提高计算精度，目标单元的密度相对于接触单元更加稀疏。

STEP 7 定义目标单元组件属性

1）单击 Next 按钮，弹出 Target Component Details 对话框，保持所有默认选项，如图 6-71 所示。

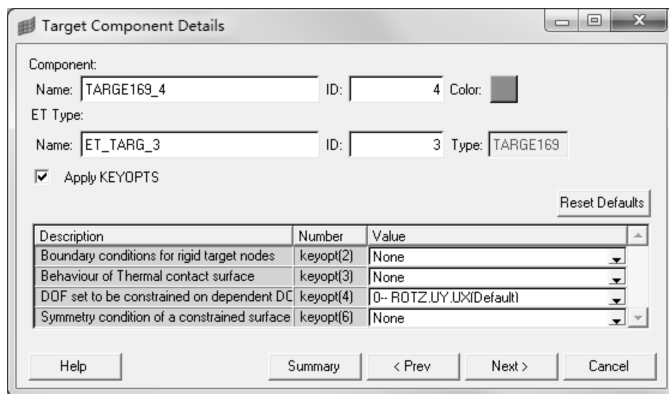


图 6-71　Target Component Details 对话框

说明：Target Component Details 对话框用于定义目标单元选项。对于本例，目标单元使用 TARGE169，可采用默认的单元选项，即保持默认值。

2）单击 Next 按钮之后，显示出图 6-72 所示的完整模型，深色粗线为生成的目标单元。同时，弹出 Contact Components Selection 对话框，如图 6-73 所示。

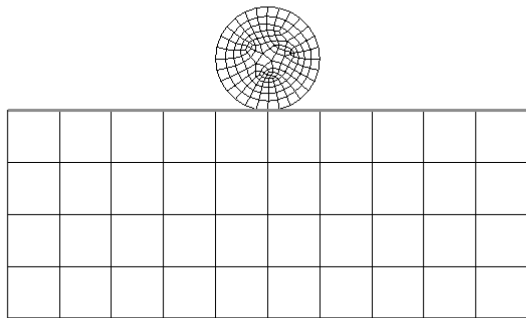


图 6-72　完整模型（含目标单元）

STEP 8 选择接触单元组件

在 Contact Components Selection 对话框中，单击 Components 按钮，选择 DISK_42 组件集，单击 proceed 按钮，返回 Contact Components Selection 对话框。此时，Next 按钮被激活。单击 Next 按钮，弹出 Contact Elements Selection 对话框，如图 6-74 所示。

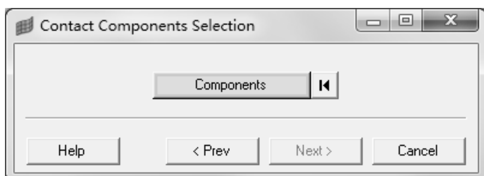


图 6-73　Contact Components Selection 对话框

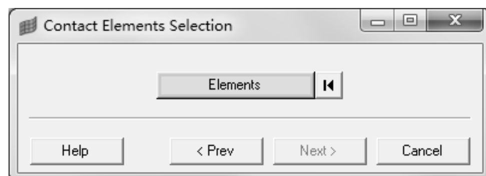


图 6-74　Contact Elements Selection 对话框

STEP 9 选择接触单元

1）在 Contact Elements Selection 对话框中，单击 Elements 按钮，激活接触单元选择面板。

2）按住〈Shift〉键，用鼠标左键框选图 6-75 所示的单元。

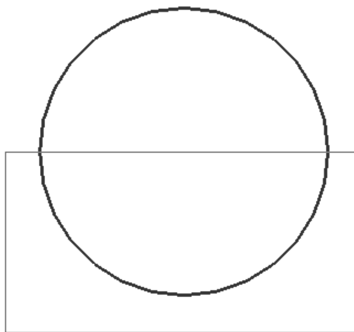


图 6-75　选择接触单元

3）单击 proceed 按钮，返回 Contact Elements Selection 对话框。此时，Next 按钮被激活。

注意：为提高计算精度，接触单元的密度相对于目标单元更加细密。

STEP 10 定义接触单元组件属性

1）单击 Next 按钮，弹出 Contact component Details 对话框，设置 keyopt（5）=1，忽略接触对的初始间隙；设置 keyopt（9）=1，忽略接触对的初始穿透；设置 keyopt（10）=2，允许 ANSYS 自动更新接触刚度，如图 6-76 所示。

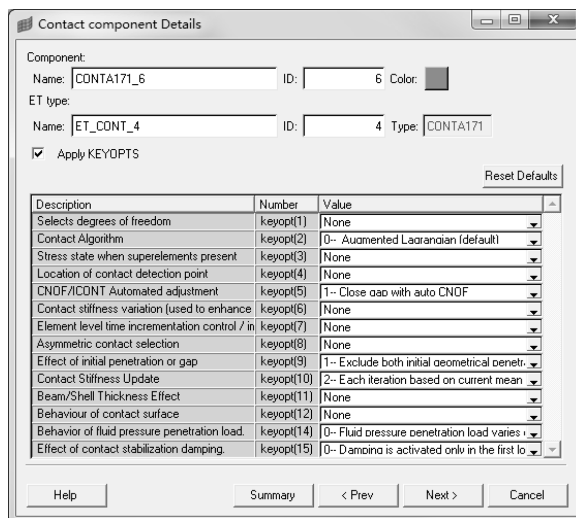


图 6-76　Contact component Details 对话框

说明：Contact component Details 对话框用于定义接触单元选项。对于本例，接触单元使用 CONTA171，可按图 6-76 设置单元选项，以增强 ANSYS 求解的收敛性。

2）单击 Next 按钮之后，显示出图 6-77 所示的完整模型，深色粗线为生成的目标单元和接触单元。同时，弹出 Contact Property 对话框，如图 6-78 所示。

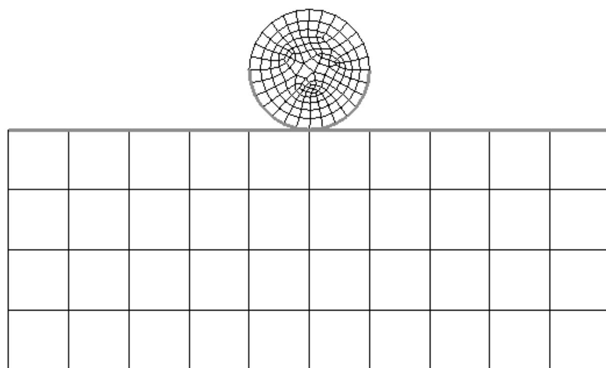


图 6-77　完整模型（含目标单元和接触单元）

STEP 11 定义接触属性

在 ANSYS 中，接触属性是指实常数。对于本例，保持所有默认值即可，如图 6-78 所示。

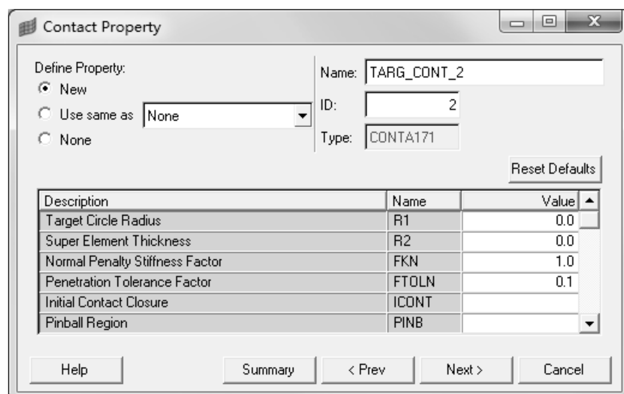


图 6-78　Contact Property 对话框

STEP 12 定义接触材料

在 Contact Property 对话框中，单击 Next 按钮，弹出 Contact Material 对话框。这里定义一种新的接触材料，保持所有默认值，如图 6-79 所示。

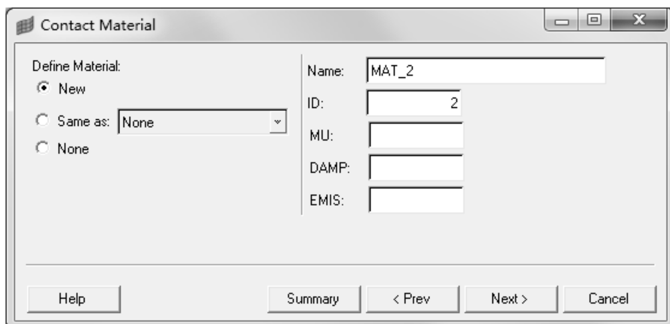


图 6-79　Contact Material 对话框

STEP 13 查看接触对汇总信息

1）在 Contact Material 对话框中，单击 Next 按钮，弹出 Ansys Contact Manager 对话框，如图 6-80 所示。

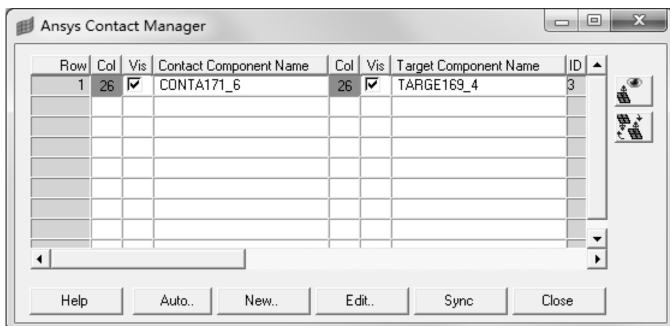


图 6-80　Ansys Contact Manager 对话框

2）单击 Close 按钮，退出 Ansys Contact Manager 对话框，完成接触对的创建。

STEP 14 设置非线性求解控制卡片

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，再单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 6-81），STATIC 表示进行静力分析。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 LNSRCH 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 6-82），表示为 Newton-Raphson 算法激活线性搜索。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 6-83），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 6-81　ANTYPE 命令



图 6-82　LNSRCH 命令



图 6-83　NLGEOM 命令

6）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 10，表示初始载荷子步为 10；将 NSBMX 设置为 20，表示最大载荷子步为 20；将 NSBMN 设置为 5，表示最小载荷子步为 5（见图 6-84）。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

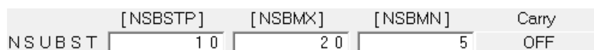


图 6-84　NSUBST 命令

7）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，再单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

8）当前的控制卡片如图 6-85 和图 6-86 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 6-85　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 6-86　控制卡片 2

说明：hm-ansys_contact_manager_2-d_tutorial.hm 模型本身包含 4 个控制卡片，即/COM、/TITLE、TREF 和 TUNIF，不用对它们进行更改。

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 10 项 ANSYS 求解命令（包含模型自带的 4 项命令）：

```
/TITLE,TARGE169 CONTA171
/COM,HyperMesh generated /PREP7 cards
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
TREF,0
TUNIF,0
LNSRCH,ON
NLGEOM,ON
NSUBST,10,20,5,OFF
SOLVE
```

STEP 15 保存模型

执行菜单命令 File→Save As，弹出 Save Model As 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-4.hm，单击“保存”按钮。

STEP 16 导出 ANSYS 模型文件

1）单击 Export Solver Deck 按钮，打开 Export 标签。

2）确认选中 Export Solver Deck 按钮，将 Export 设置为 All，导出所有数据。单击 Select file 按钮，弹出 Select ANSYS file 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-4.cdb，单击“保存”按钮，返回 Export 标签，单击 Export 按钮生成 Exercise6-4.cdb 文件，如图 6-87 所示。

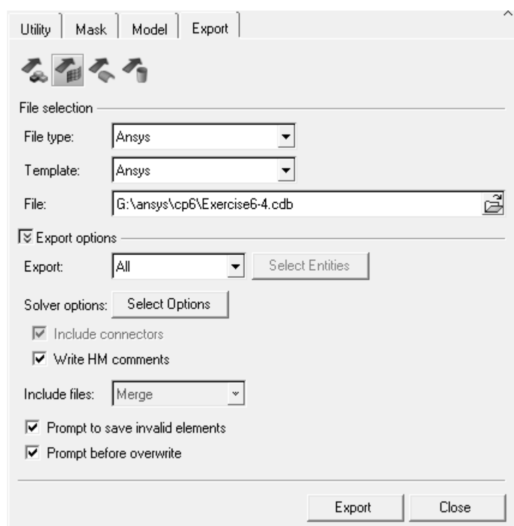


图 6-87　导出 ANSYS 模型文件

STEP 17 结果后处理

HyperMesh 已经为 ANSYS 设置单元选项、实常数、材料特性、边界条件、载荷和求解选项等信息。ANSYS 可直接打开 Exercise6-4.cdb 文件并自动求解。图 6-88 为模型的 von Mises

应力云图。

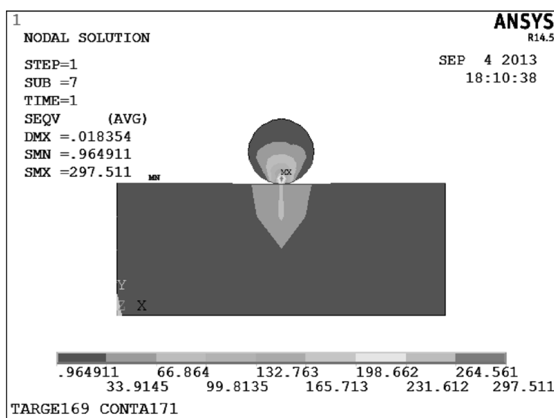


图 6-88 von Mises 应力云图

6.6 实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建三维接触模型

本实例讲解利用 HyperMesh 接触向导为 ANSYS 创建三维面-面接触对，利用 HyperMesh 为 ANSYS 设置非线性求解控制参数，并导入 ANSYS 进行静力分析。

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 加载 ANSYS 模板

启动 HyperMesh，执行菜单命令 Preferences→User Profiles，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 ANSYS，单击 OK 按钮。

STEP 2 读取模型文件

单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\interfaces\ansys\下找到 hm-ansys_contact_manager_3-d_tutorial.hm 文件并打开，模型如图 6-89 所示。

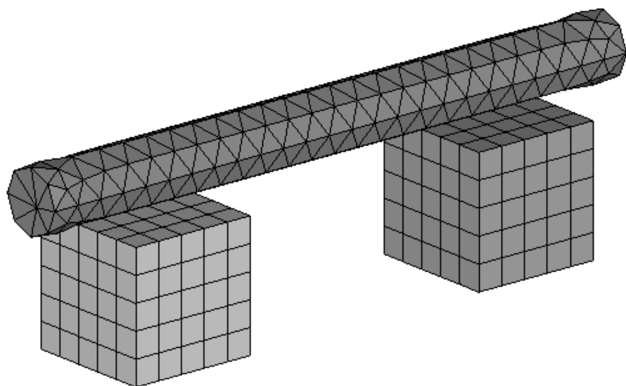


图 6-89 hm-ansys_contact_manager_3-d_tutorial.hm 模型

STEP 3 启动 ANSYS 接触向导

利用 HyperMesh Utility 选项卡中的 Contact Manager 工具进入接触向导，如图 6-90 所示。

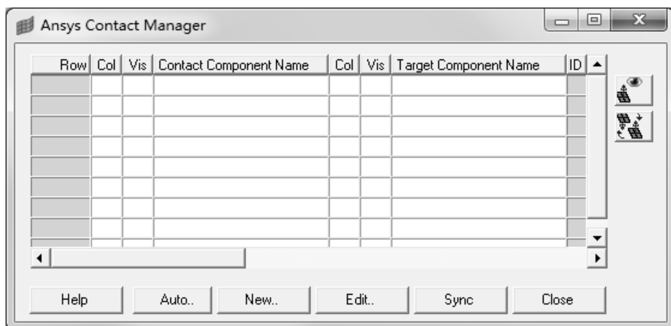


图 6-90　ANSYS 接触向导

STEP 4 创建新的三维接触对

单击 New 按钮，弹出 Create New Contact Pair 对话框，将 Creation method 设置为 Flexible，Contact type 设置为 3D，Create from 设置为 Surface to surface，Symmetric Contact 设置为 No，如图 6-91 所示。

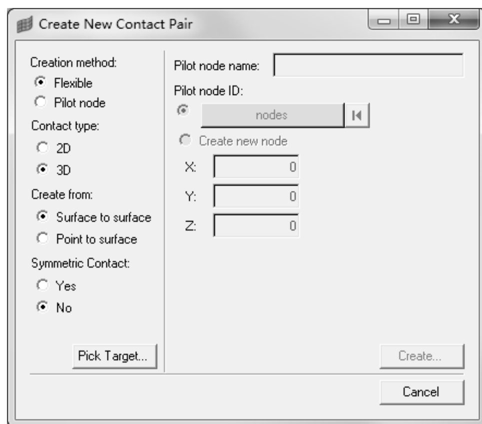


图 6-91　Create New Contact Pair 对话框

STEP 5 选择目标单元组件

单击 Pick Target 按钮，选择 CYLINDER_SOLID45 组件集，单击 proceed 按钮，弹出 Target Elements Selection 对话框，如图 6-92 所示。同时，目标体的表面单元被提取出来，如图 6-93 所示。

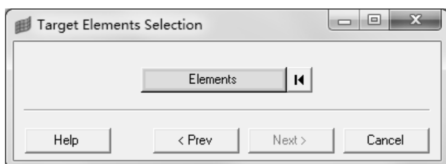


图 6-92　Target Elements Selection 对话框

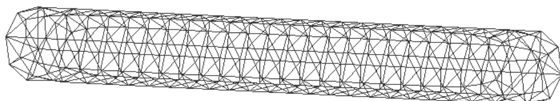
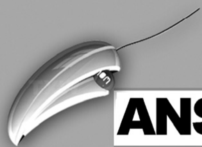


图 6-93　目标体的表面单元



STEP 6 选择目标单元

1）在 Target Elements Selection 对话框中，单击 Elements 按钮，激活目标单元选择面板。

2）在工具栏中，单击 XY Top Plane View 按钮，调整模型的显示视角。

2）按住〈Shift〉键，用鼠标左键框选图 6-94 所示的单元。单击 proceed 按钮，返回 Target Elements Selection 对话框。此时，Next 按钮被激活。

STEP 7 定义目标单元组件属性

1）单击 Next 按钮，弹出 Target Component Details 对话框，保持所有默认选项，如图 6-95 所示。

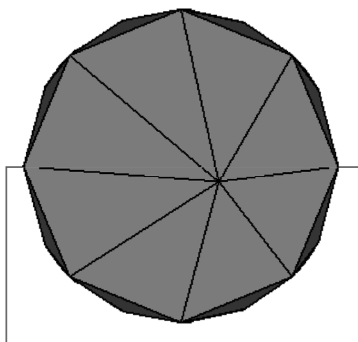


图 6-94　选择目标单元

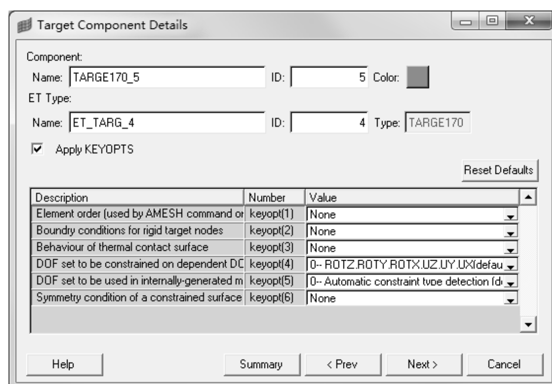


图 6-95　Target Component Details 对话框

说明：Target Component Details 对话框用于定义目标单元选项。对于本例，目标单元使用 TARGE170，可采用默认的单元选项，即保持默认值。

2）单击 Next 按钮之后，显示出图 6-96 所示的完整模型。同时，弹出 Contact Components Selection 对话框，如图 6-97 所示。

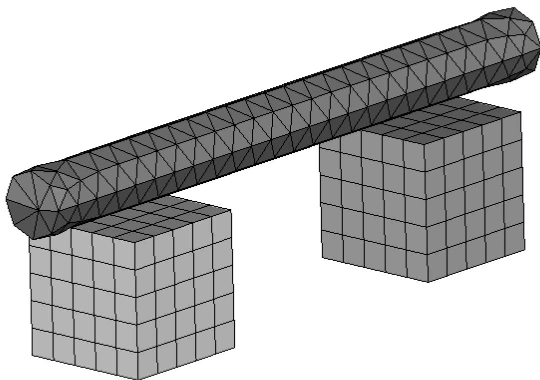


图 6-96　完整模型（含目标单元）

STEP 8 选择接触单元组件

在 Contact Components Selection 对话框中，单击 Components 按钮，选择 BOX_SOLID95 组件集，单击 proceed 按钮，返回 Contact Components Selection 对话框。此时，Next 按钮被激

活。单击 Next 按钮，弹出 Contact Elements Selection 对话框，如图 6-98 所示。同时，接触体的表面单元被提取出来，如图 6-99 所示。

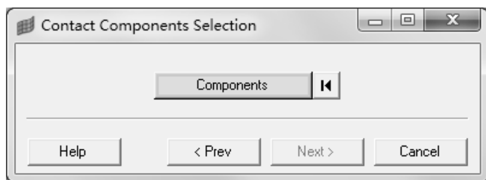


图 6-97　Contact Components Selection 对话框

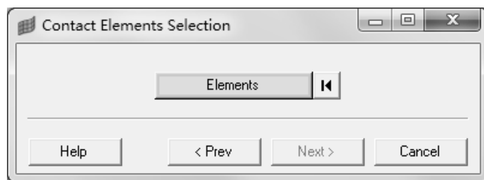


图 6-98　Contact Elements Selection 对话框

STEP 9 选择接触单元

1）在 Contact Elements Selection 对话框中，单击 Elements 按钮，激活接触单元选择面板。

2）选择立方体顶面的一个单元，再单击 elems 按钮，在弹出的面板中选择 by face 方法，即选中立方体顶面的所有接触单元，如图 6-100 所示。

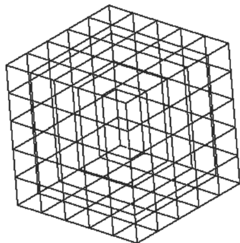


图 6-99　接触体的表面单元

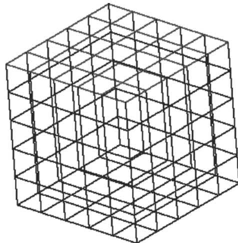


图 6-100　选择接触单元

3）单击 proceed 按钮，返回 Contact Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。

STEP 10 定义接触单元组件属性

1）单击 Next 按钮，弹出 Contact component Details 对话框，设置 keyopt（10）=2，允许 ANSYS 自动更新接触刚度，如图 6-101 所示。

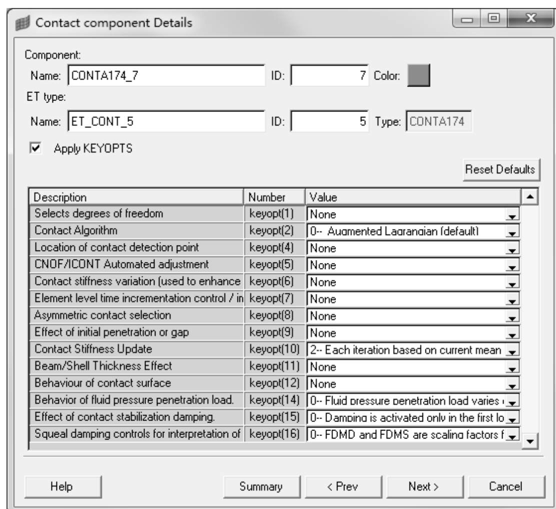
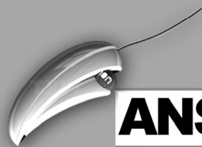


图 6-101　Contact component Details 对话框



说明：Contact component Details 对话框用于定义接触单元选项。对于本例，接触单元使用 CONTA174，可按图 6-101 设置单元选项，以增强 ANSYS 求解的收敛性。

2）单击 Next 按钮之后，显示出如图 6-102 所示的完整模型。同时，弹出 Contact Property 对话框，如图 6-103 所示。

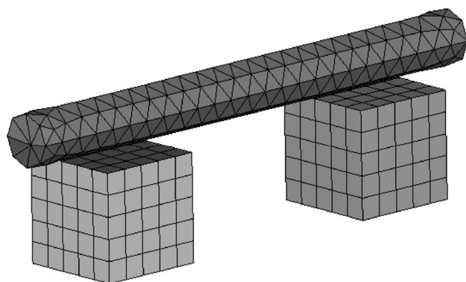


图 6-102　完整模型（含一对接触对）

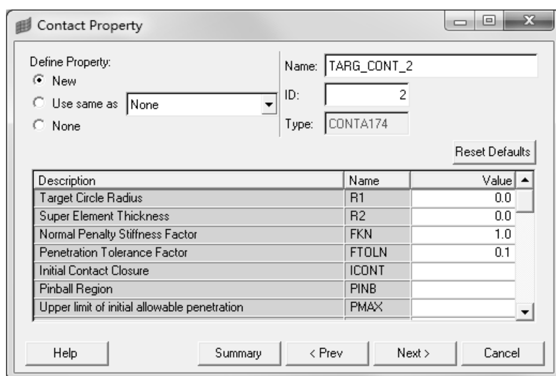


图 6-103　Contact Property 对话框

STEP 11 定义接触属性

在 ANSYS 中，接触属性是指实常数。对于本例，保持所有默认值即可，如图 6-103 所示。

STEP 12 定义接触材料

在 Contact Property 对话框中，单击 Next 按钮，弹出 Contact Material 对话框。这里定义一种新的接触材料，保持所有默认值，如图 6-104 所示。

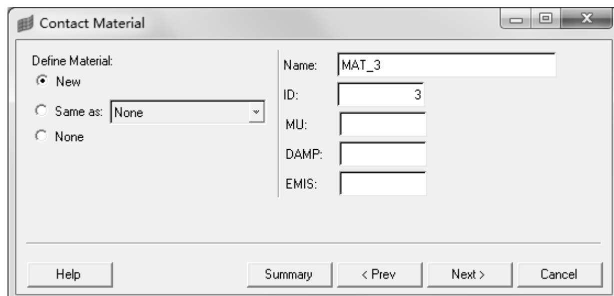


图 6-104　Contact Material 对话框

STEP 13 检查单元法向

1）在 Contact Material 对话框中，单击 Next 按钮，弹出 Contact/Target Normal 对话框，如图 6-105 所示。同时，显示出单元法向，如图 6-106 所示。

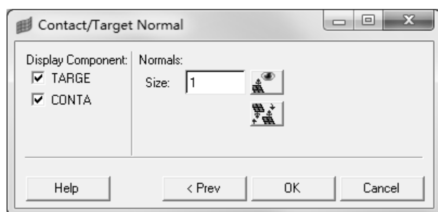


图 6-105 Contact/Target Normal 对话框

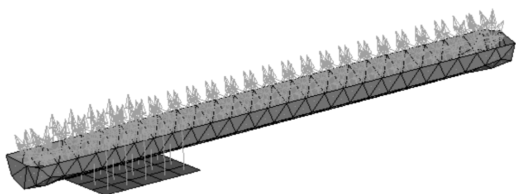


图 6-106 单元法向

2）必须确保目标单元和接触单元法向相对，否则，ANSYS 求解器将产生错误。对于本例，须调整目标单元的法向。在 Contact/Target Normal 对话框中，取消勾选 CONTA 复选框，再单击 Reverse normals 按钮，将目标单元的法向反向，如图 6-107 所示。

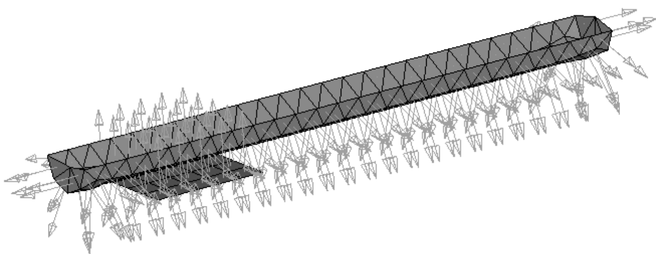


图 6-107 调整单元法向

STEP 14 查看接触对汇总

在 Contact/Target Normal 对话框中，单击 OK 按钮，弹出 Ansys Contact Manager 对话框，如图 6-108 所示。

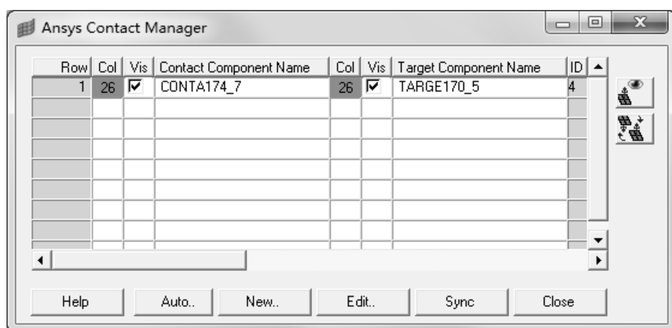


图 6-108 Ansys Contact Manager 对话框

STEP 15 创建另一对三维接触对

1）重复第 4 步～第 14 步，创建另一对三维接触对。须要注意的是，须选择 CYLINDER_SOLID45 为目标体，BOX_SOLID45 为接触体。

2）BOX_SOLID45 组件中的单元为低阶六面体，而 BOX_SOLID95 组件中的单元为高阶六面体，所以需要分别创建接触对。

3）对于第二对接触对，接触单元使用 CONTA173，仍须设置 keyopt（10）=2，以增强 ANSYS 求解的收敛性。

4）定义了两对接触对之后，完整的模型如图 6-109 所示，Ansys Contact Manager 对话框如图 6-110 所示。

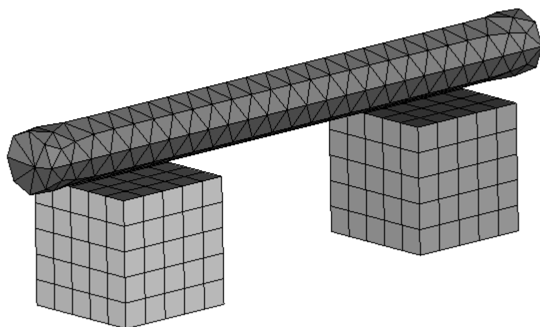


图 6-109　完整模型（含两对接触对）

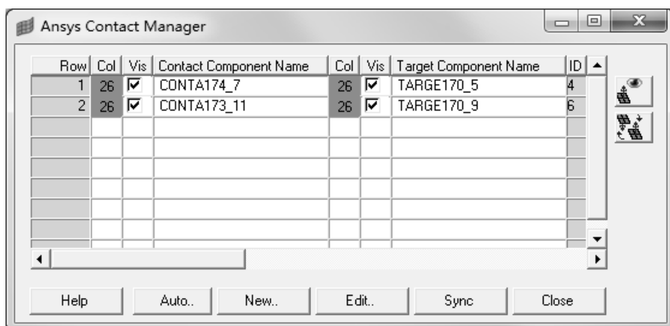


图 6-110　Ansys Contact Manager 对话框

5）在 Ansys Contact Manager 对话框中，单击 Close 按钮，退出 Ansys Contact Manager 对话框，完成接触对的创建。

STEP 16 设置非线性求解控制卡片

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 LNSRCH 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 6-111），表示为 Newton-Raphson 算法激活线性搜索。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 6-112），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 10，表示初始载荷子步为 10；将 NSBMX 设

置为 20，表示最大载荷子步为 20；将 NSBMN 设置为 5，表示最小载荷子步为 5（见图 6-113）。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。





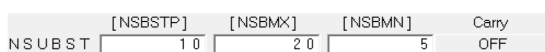


图 6-111　LNSRCH 命令　图 6-112　NLGEOM 命令　　　　图 6-113　NSUBST 命令

6）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

7）当前的控制卡片如图 6-114 和图 6-115 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 6-114　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 6-115　控制卡片 2

说明：hm-ansys_contact_manager_3-d_tutorial.hm 模型本身包含 5 个控制卡片，即/COM、ANTYPE、/TITLE、TREF 和 TUNIF，不用对它们进行更改。

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 10 项 ANSYS 求解命令（包含模型自带的 5 项命令）：

```
/TITLE,CONTAC3D_3575
/COM,HyperMesh generated /PREP7 cards
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
TREF,0
TUNIF,0
LNSRCH,ON
NLGEOM,ON
NSUBST,10,20,5,OFF
SOLVE
```

STEP 17 保存模型

执行菜单命令 File→Save As，弹出 Save Model As 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-5.hm，单击“保存”按钮。

STEP 18 导出 ANSYS 模型文件

1）单击 Export Solver Deck 按钮，打开 Export 标签。

2）确认选中 Export Solver Deck 按钮，将 Export 设置为 All，导出所有数据。单击 Select file 按钮，弹出 Select ANSYS file 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-5.cdb，单击“保存”按钮，返回 Export 标签，单击 Export 按钮生成 Exercise6-5.cdb 文件，如图 6-116 所示。

STEP 19 结果后处理

HyperMesh 已经为 ANSYS 设置单元选项、实常数、材料特性、边界条件、载荷和求解选项等信息。ANSYS 可直接打开 Exercise6-5.cdb 文件并自动求解。图 6-117 为模型的 von Mises 应力云图。

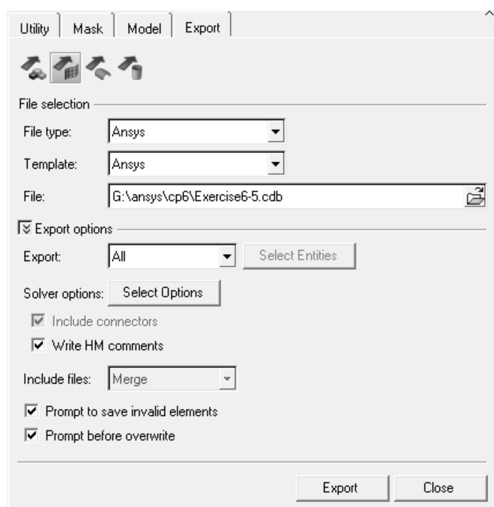


图 6-116　导出 ANSYS 模型文件

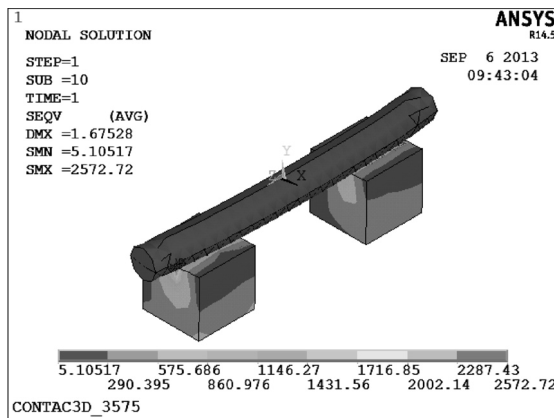


图 6-117　von Mises 应力云图

6.7　实例：利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建梁单元

HyperBeam 是 HyperMesh 用于创建梁截面的工具。利用 HyperBeam 为 ANSYS 创建梁截面时应注意以下几点：

1）HyperBeam 的梁截面坐标系与 ANSYS 的梁截面坐标系正好对调。为了使 ANSYS 正确识别梁单元的横截面方向，对方向节点的设置非常重要，本节实例的第 5 步给出了创建梁单元的过程。

2）ANSYS 可通过命令 SECOFFSET 控制单元节点的放置位置（可考虑梁的偏置），默认为 CENT（质心），也可根据实际需要设置为 SHRC（剪切中心）、ORIGIN（原点）或者 USER（指定截面的局部坐标位置）。

3）ANSYS 梁截面的原点（可由 SECDATA 命令查询）与 HyperBeam 不一致，使用时应以 ANSYS 为准，但坐标方向应以 HyperBeam 为准，主要用于考虑梁的偏置。例如：SECOFFSET, USER, 5, 10 表示将单元节点放置于截面坐标位置（5,10），5 表示 HyperBeam 的 Y 坐标，10

表示 HyperBeam 的 Z 坐标。图 6-118 所示为梁截面示意图，图中画出了 ANSYS 原点和 HyperBeam 的坐标方向，未画出 HyperBeam 原点和 ANSYS 坐标方向。

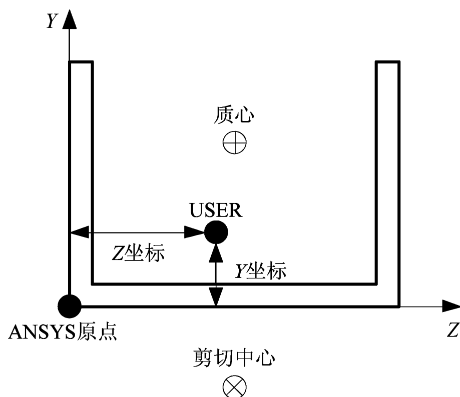


图 6-118 梁截面示意图

4）若将单元节点放置于质心或剪切中心，ANSYS 与 HyperBeam 将显示出相同的截面位置。其余两种方式则存在差异，但应以 ANSYS 为准。应始终记得在 ANSYS 中检查梁单元截面显示是否正确。

以下将介绍利用 HyperMesh 为 ANSYS 创建梁单元，定义横截面、边界条件、载荷和求解选项，并导入 ANSYS 进行静力分析。

图 6-119 所示为原始模型，可简化为板壳单元和梁单元的组合，如图 6-120 所示。

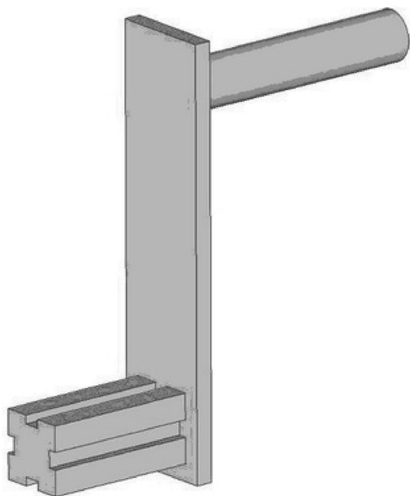


图 6-119 原始模型

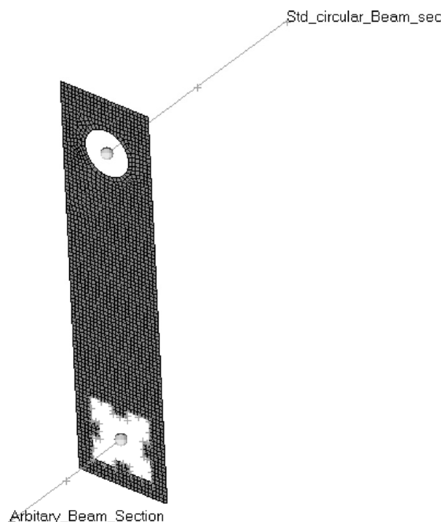


图 6-120 简化模型

STEP 1 加载 ANSYS 模板

启动 HyperMesh，执行菜单命令 Preferences→User Profiles，在弹出的 User Profiles 对话框中选择 ANSYS，单击 OK 按钮。

STEP 2 读取模型文件

单击 Open Model 按钮，在<安装目录>\tutorials\hm\interfaces\ansys\下找到 chapter3.hm 文件并打开，模型如图 6-120 所示。

STEP 3 添加单元类型

1）在 Utility 选项卡中，单击 ET Type 按钮，弹出 ET Type 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create ET Type 对话框。从 Element type 下拉列表框中选择 BEAMS→BEAM188 单元。单击 Create/Edit 按钮，勾选 kopt3_FLAG 复选框，并设置 kopt3=3，单击 return 按钮，返回 ET Type 对话框。

梁的横向弯曲变形模式为三次多项式。对于 BEAM188 单元，kopt3=3 表示设置单元选项 K3=3（Cubic Form），即设置单元形函数为三次式，以提高计算精度。

3）单击 Close 按钮，退出 Create ET Type 对话框。

4）单击 Close 按钮，退出 ET Type 对话框。

STEP 4 创建组件集

1）在 Utility 选项卡中，单击 Component Manager 按钮，弹出 Components 对话框。

2）执行菜单命令 Action→Create New，弹出 Create Component 对话框。

3）将 Component name 设置为 beam_std，Element reference number 设置为 2-（ET_21）BEAM188，Material reference number 设置为 1-Steel，并为组件集选择一种颜色，如图 6-121 所示。

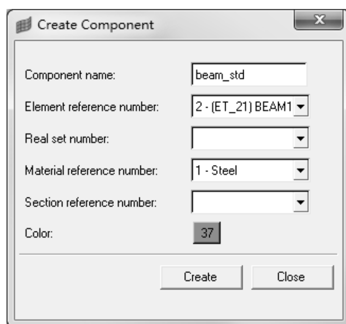


图 6-121　Create Component 对话框

4）单击 Create 按钮，创建名称为 beam_std 的组件集。

5）重复步骤 3）和 4），创建名称为 beam_asec 的组件集。

6）单击 Close 按钮，退出 Create Component 对话框。

7）关闭 Components 对话框。

STEP 5 创建梁单元

1）在 1D 页面中选择 bars 面板。

2）确认选中 bar2 子面板，将 elem types 切换为 BEAM188，orientation 切换为 direction node，如图 6-122 所示。



图 6-122　bars 面板

3）将 node A 和 node B 分别选择标签为 Arbitary_Beam_Section 的线条（见图 6-120）的两个端点，direction node 选择 id 号为 325 的节点，创建一个梁单元，之后单击 return 按钮，退出 bars 面板。梁单元放置于当前组件集 beam_asec。

4）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击 beam_std 组件集，选择 Make Current，使其成为当前组件集。

5）在 1D 页面中选择 line mesh 面板。

6）按图 6-123 所示设置各选项，注意将 direction node 设置为 z direction。

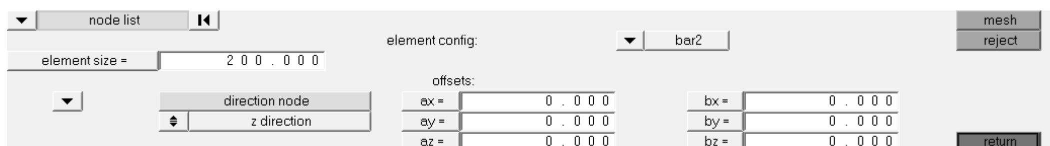


图 6-123　line mesh 面板

7）将 node list 选择标签设置为 Std_circular_Beam_sec 的线条（见图 6-120）的两个端点，direction node 选择 id 号为 305 的节点，单击 mesh 按钮，再单击 return 按钮，创建一个梁单元。梁单元放置于当前组件集 beam_std。

8）单击 return 按钮，退出 line mesh 面板。

注意：一个梁单元由两个节点和一个方向节点组成，本步骤采用了两种方式创建梁单元。bars 面板用于直接创建梁单元，而 line mesh 面板以网格划分的方式创建梁单元。由于 HyperBeam 的梁截面坐标系与 ANSYS 的梁截面坐标系正好对调，为了使 ANSYS 正确识别梁单元的横截面方向，按照图 6-122 和图 6-123 所示定义方向节点非常重要。

STEP 6 耦合自由度——创建刚性区域

1）单击 Components 按钮，将 comp name 设置为 CERIG，将颜色切换为红色，然后单击 create 按钮，如图 6-124 所示。



图 6-124　创建 CERIG 组件集

2）在 1D 页面中选择 rigids 面板。

3）确认选中所有自由度，将 elem types 设置为 CERIG，将 dependent 切换为 nodes，如图 6-125 所示。

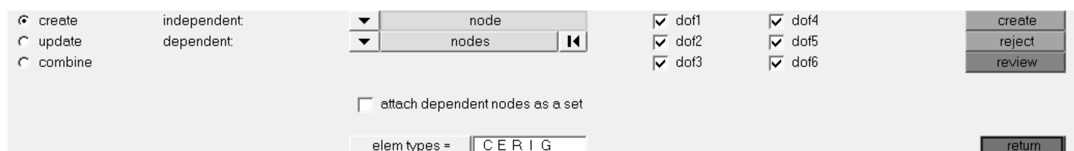


图 6-125　rigids 面板

4）按图 6-126 所示分别选择 independent node 和 dependent nodes，并单击 create 按钮，创建 CERIG 刚性区域，如图 6-127 所示。

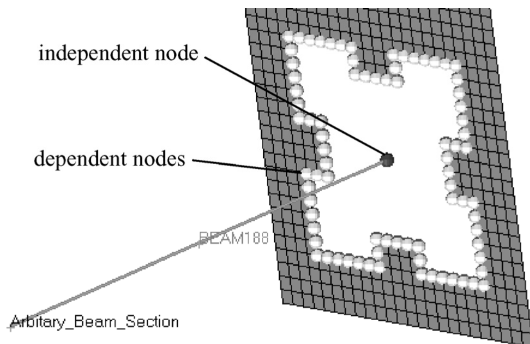


图 6-126　选择节点

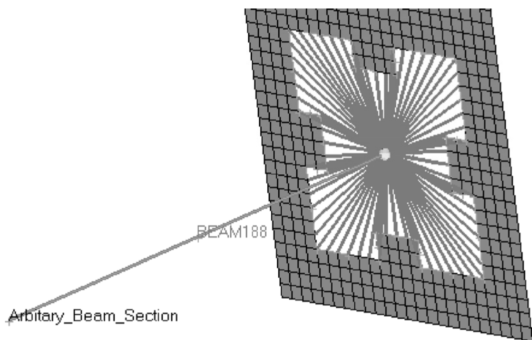


图 6-127　CERIG 刚性区域

5）按图 6-128 所示分别选择 independent node 和 dependent nodes，并单击 create 按钮，创建 CERIG 刚性区域，如图 6-129 所示。

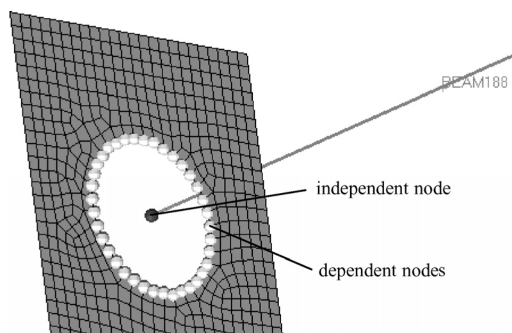


图 6-128　选择节点

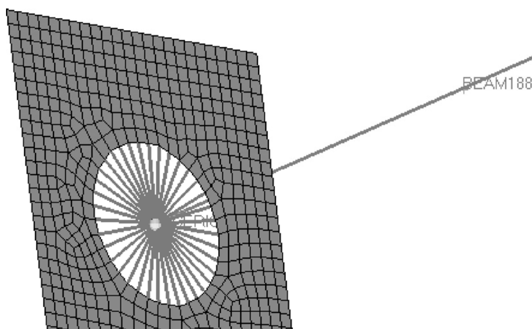


图 6-129　CERIG 刚性区域

6）单击 return 按钮，退出 rigids 面板。

STEP 7 创建标准圆形梁截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Circular_sec，Section type 为 BEAM，Sub section type 为 CSOLID，勾选 Define by HyperBeam 复选框，并选择 New section 单选按钮，如图 6-130 所示。

3）单击 Creat/Edit 按钮，弹出 HyperBeam 数据浏览器。在左下方的 Parameters Definition 中，设置 Radius（r）=15，表示圆的截面半径为 15。

4）执行菜单命令 File→Exit，退出 HyperBeam 数据浏览器，返回 Create Section 对话框。

5）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

6）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 8 创建用户自定义梁截面

1）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击空白处，在弹出的菜单中执行 Creat→Beam Section 命令，弹出 Create Beam Section 对话框。

2）将 Name 设置为 Arbi_sec，Card image 设置为 SECTYPE，之后单击 Create 按钮，如图 6-131 所示。

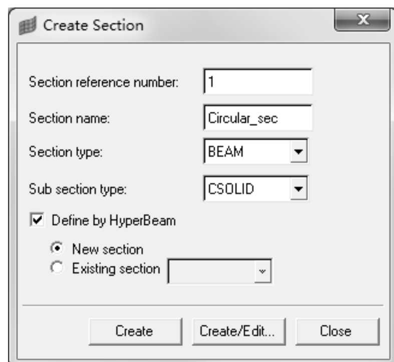


图 6-130 Create Section 对话框

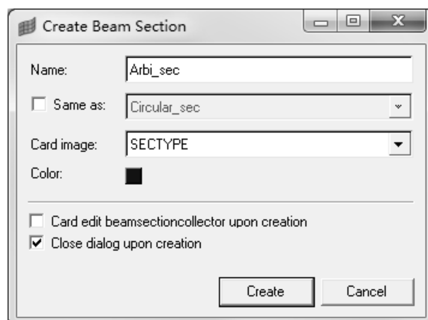


图 6-131 Create Beam Section 对话框

3）在 Model 浏览器中，取消所有单元显示，仅保留几何显示，如图 6-132 所示。

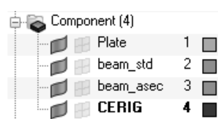


图 6-132 仅保留几何显示

4）在 1D 页面中选择 HyperBeam 面板，再选中 solid section 子面板，将 section base node 设置为 centroid，其余保持默认选项，如图 6-133 所示。



图 6-133 solid section 子面板

5）在图 6-134 中，选中除标签为 Arbitary_Beam_Section 的线条之外的所有线条。

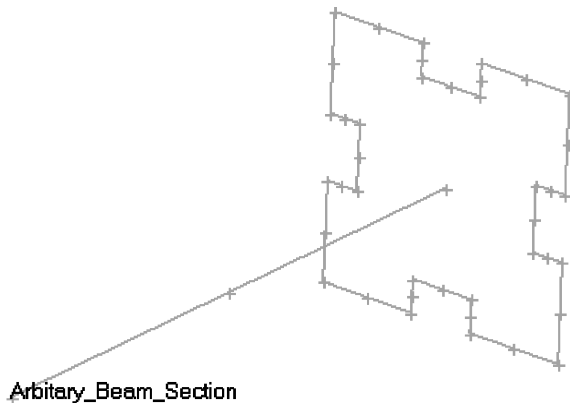


图 6-134 选择线条

6）单击 creat 按钮，弹出 HyperBeam 数据浏览器。HyperBeam 用四边形网格对所选线条组成的封闭截面进行了网格划分，同时计算出截面数据。

7）执行菜单命令 File→Exit，退出 HyperBeam 数据浏览器，再单击 return 按钮，退出 solid section 子面板。

8）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击 Arbi_sec 选项，并选择 Card Edit 命令，弹出梁截面设置卡片，单击 Select a beamsection[OPTIONAL]按钮两次，选择 HyperBeam 创建的自定义梁截面 solid_section.1，如图 6-135 所示。

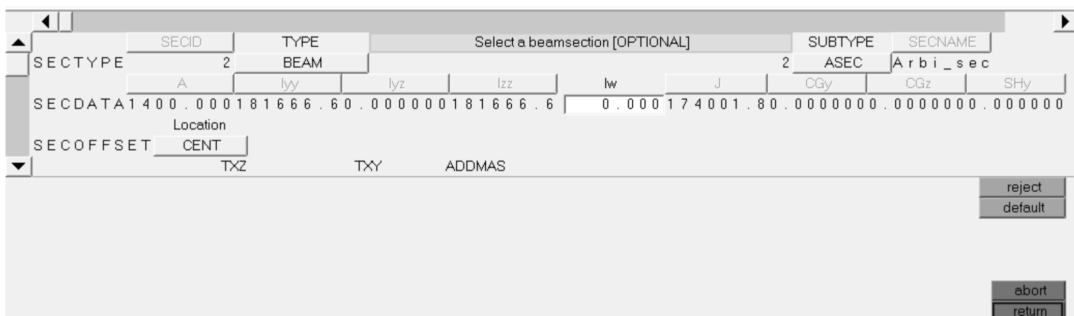


图 6-135　梁截面设置卡片

9）单击 return 按钮，退出梁截面设置卡片。

10）在 Model 浏览器中，开启所有单元显示。

STEP 9 更新组件横截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Component Manager 按钮，弹出 Components 对话框。

2）执行菜单命令 Table→Editable，使表格处于可编辑状态。

3）在 Assign Values 区域，选择 Section Set No.。

4）单击 beam_std 组件，使其处于选中状态，在下拉列表框中选择 1-（Circular_sec）BEAM，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the Section Set No.?”，单击 Yes 按钮，则 beam_std 组件中的梁单元截面指定为标准圆形截面。

5）单击 beam_asec 栏，使其处于选中状态，在下拉列表框中选择 2-（Arbi_sec）BEAM，单击 Set 按钮，弹出信息“Do you want to change the Section Set No.?”，单击 Yes 按钮，则 beam_asec 组件中的梁单元截面指定为用户自定义梁截面。

6）关闭 Components 对话框。

将梁截面赋予 beam_std 组件和 beam_asec 组件之后，通过三维单元显示模式，板壳单元和梁单元将以三维实体的方式显示，如图 6-136 所示。

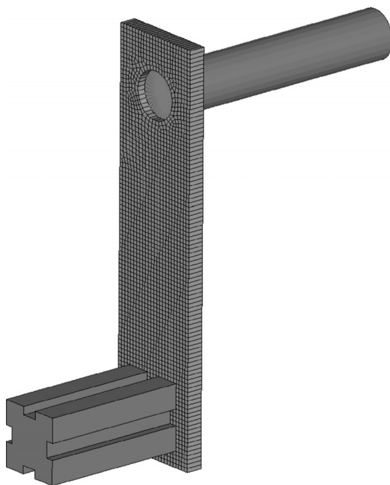


图 6-136　三维实体显示板壳单元和梁单元

STEP 10 创建载荷集

1）单击 Load Collectors 按钮，将 Loadcol name 设置为 constraints，为组件集指定一种颜色，然后单击 create 按钮，如图 6-137 所示。

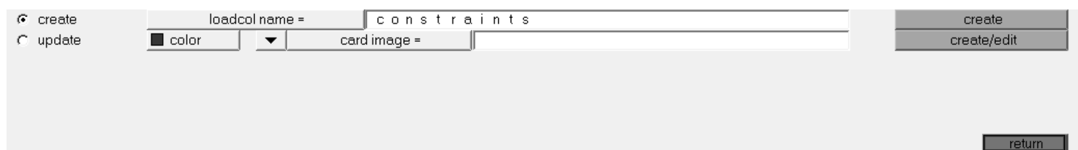


图 6-137 创建 constraints 载荷集

2）重复步骤 1），创建名称为 force 的载荷集，之后单击 return 按钮退出面板。

STEP 11 为模型添加自由度约束

1）在 Model 浏览器中展开 Load Collector 文件夹，用鼠标右键单击 constraints，并选择 Make Current 命令，新创建的约束将放置于 constraints 载荷集。

2）在 Analysis 页面中选择 constraints 面板。

3）确认选中 dof1~dof6，选择图 6-120 中标签为 Arbitary_Beam_Section 的线条的左端节点，然后单击 create 按钮，如图 6-138 所示。

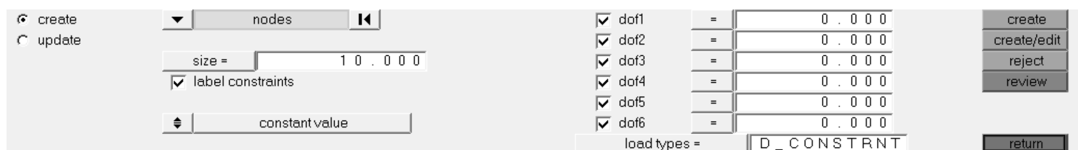


图 6-138 添加自由度约束

STEP 12 施加力载荷

1）在 Model 浏览器中，用鼠标右键单击 force，并选择 Make Current 命令，新创建的力载荷将放置于 force 载荷集。

2）在 Analysis 页面中选择 forces 面板。

3）确认 nodes 为默认选项，将 magnitude 设置为-1000，加载方向切换为 y-axis，uniform size 设置为 100，如图 6-139 所示。

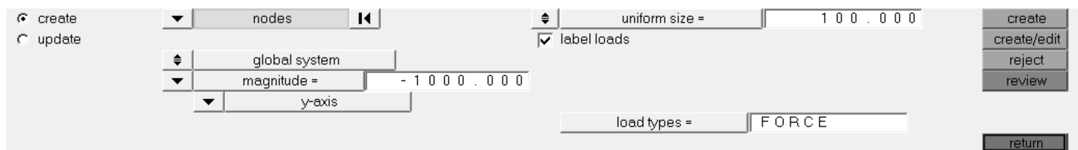


图 6-139 施加力载荷

4）选中图 6-120 中标签为 Std_circular_Beam_sec 的线条的右端节点，然后单击 create 按钮，创建幅值为 1000 的力载荷，之后单击 return 按钮退出面板。

STEP 13 添加求解控制卡片

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，之后单击 return 按钮两次，退出 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

本步骤添加了两项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

STEP 14 保存模型

执行菜单命令 File→Save As，弹出 Save Model As 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-6.hm，单击“保存”按钮。

STEP 15 导出 ANSYS 模型文件

1）单击 Export Solver Deck 按钮，打开 Export 标签。

2）确认选中 Export Solver Deck 按钮，将 Export 设置为 All，导出所有数据，单击 Select file 按钮，弹出 Select ANSYS file 对话框，选择模型保存路径，并输入文件名 Exercise6-6.cdb，单击“保存”按钮，返回 Export 标签，单击 Export 按钮生成 Exercise6-6.cdb 文件，如图 6-140 所示。

STEP 16 结果后处理

HyperMesh 已经为 ANSYS 设置了单元选项、实常数、横截面、材料特性、边界条件、载荷、求解选项等信息。ANSYS 可直接打开 Exercise6-6.cdb 文件并自动求解。图 6-141 所示为模型的 von Mises 应力云图。

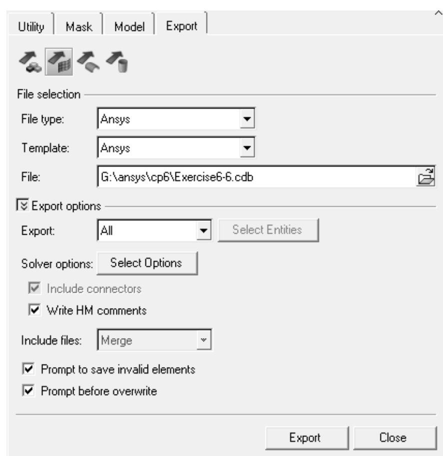


图 6-140 导出 ANSYS 模型文件

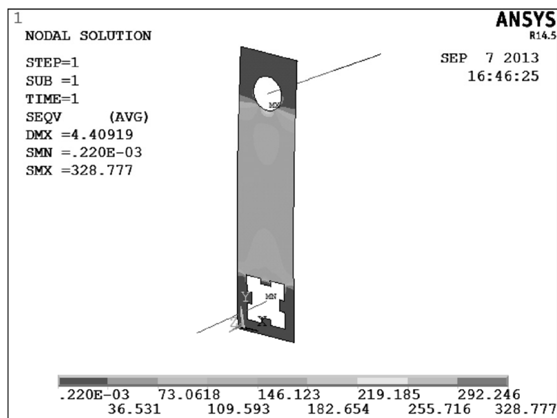


图 6-141 von Mises 应力云图

6.8 本章小结

1）本章给出了 6 个实例，详细介绍了 HyperMesh 与 ANSYS 联合仿真的全过程。这 6 个实例源于 HyperMesh 教程，但都进行了改造和优化，并修正了部分错误。

2）在每个实例中，没有改动原模型自带的设置和参数，只对后续操作步骤进行了优化，以满足新版 ANSYS 求解器的要求。为了理解实例中的某些设置，例如单元选项、实常数、接触建模等，读者应熟悉 ANSYS 高级单元技术（第 2 章）和接触技术（第 15 章）。



第 7 章 静 力 分 析

静力分析用来计算结构在稳态载荷作用下引起的位移、应力、应变和力。静力分析不考虑惯性和阻尼效应的影响。但是，静力分析可以包含稳定的惯性力（如重力和旋转件所受的离心力），以及能够被等效为静态载荷的随时间变化的载荷（如等效静力风载和地震载荷）。

静力分析可分为线性静力分析和非线性静力分析。非线性静力分析可包含所有类型的非线性，如大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触（间隙）单元、超弹性单元等。

本章主要介绍了线性结构静力分析的基本原理和分析步骤，并结合实例，讲解了如何利用 HyperMesh 为 ANSYS 划分网格、设置单元选项、设置材料特性、定义边界条件、创建载荷步和定义求解选项。

7.1 静力分析的求解方法

线性结构的静力分析平衡方程为

$$[K]\{U\}=\{F\} \tag{7-1}$$

式中，$[K]$为系统刚度矩阵；$\{U\}$为系统节点位移向量；$\{F\}$为系统节点力向量。

通过求解方程式（7-1），可得到系统各节点位移，再由几何方程和本构方程进一步得到各单元内部的应变以及应力。

对于静力分析，ANSYS 14.5 提供了以下 4 种方程求解器。

1）程序选择求解器（Program Chosen Solver）：ANSYS 根据问题的领域自动选择一个求解器，为默认项。

2）稀疏矩阵求解器（Sparse Direct Solver）：对线性和非线性、静力和完全瞬态分析，为默认项。

3）PCG 求解器（Preconditioned Conjugate Gradient Solver）：对于较大规模的有限元模型，如单元数量超过 500 万个，推荐使用该求解器。

4）迭代求解器（Iterative Solver）：只适用于线性静力/完全瞬态结构分析或稳态温度场分析。

通常，可让 ANSYS 自动选择求解器，即采用默认设置：程序选择求解器（Program Chosen Solver）。

7.2 静力分析的基本步骤

7.2.1 建立有限元网格模型

根据实际问题的特点，对所分析的问题进行初步计划；建立反映真实物理情况的 CAD 模型或简化的 CAD 模型，并对其划分有限元网格；定义单元类型、单元选项、实常数、截面特

性和材料特性。

在进行静力分析时，要注意如下内容：

1）可以采用线性或非线性结构单元。

2）材料特性可以是线性的或非线性的、各向同性的或正交各向异性的、恒定的或与温度相关的。

3）必须按某种形式定义刚度，如杨氏模量 EX。

4）对于惯性载荷（如重力），必须定义质量计算所需的数据，如密度 DENS。

5）对于温度载荷，必须定义热膨胀系数 ALPX。

对于网格密度，要注意如下内容：

1）应力或应变急剧变化的区域通常是用户感兴趣的区域，需要较密的网格。

2）考虑非线性的影响时，要用足够的网格来捕捉非线性效应，如塑性分析需要适当的积分点密度，因而在高塑性变形梯度区域需要较密的网格。

7.2.2 施加边界条件及载荷

在结构分析中，静力分析所施加的载荷一般包括：

1）外部施加的作用力/力矩和压力。

2）稳态的惯性力，如重力或旋转件所受的离心力。

3）强迫位移。

7.2.3 设置求解控制选项

求解控制包括定义分析类型、设置基本分析选项和指定载荷步选项等。进行结构静力分析时，可以通过 Solution Controls 对话框来设置这些选项，如图 7-1 所示。对于大多数的结构静力分析，该对话框已设置好合适的默认值，用户无需做任何更改。

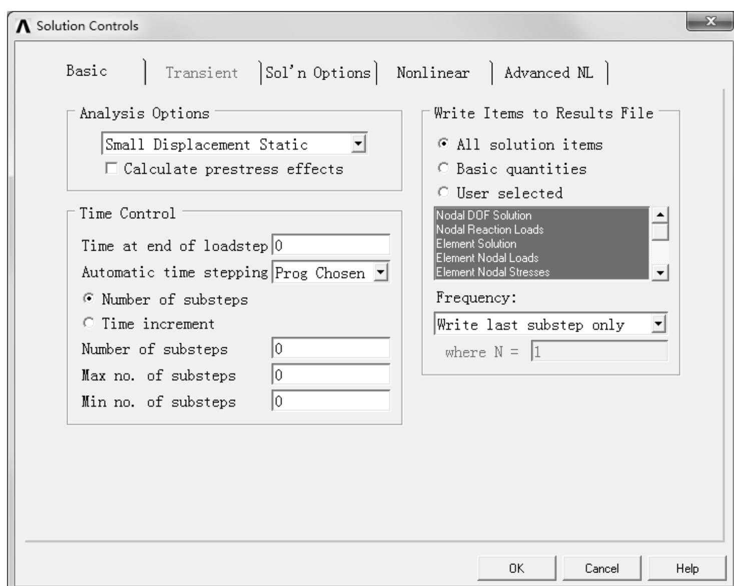


图 7-1 Solution Controls 对话框

7.2.4 求解

在执行求解命令之前，可将当前模型进行备份，以便将来恢复模型。

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS/From LS Files（后者用于求解多载荷步）

7.2.5 查看结果

静力分析的结果保存于结构分析结果文件（Jobname.rst）中，包括以下内容：

1）基本解

节点位移 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ。

2）导出解

① 节点和单元应力。

② 节点和单元应变。

③ 单元力。

④ 节点反力。

⑤ 其余解。

用户可以使用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 进行后处理，查看计算结果。POST1 用于对整个模型在某一子步（时间点）的结果进行检查；POST26 用于在非线性静力分析中跟踪整个载荷作用历程上的特定结果。

7.3 静力分析实例

图 7-2 为内六角扳手，在手柄端部施加 20N 和 100N 的力，扳手底部固定约束，求解扳手位移和应力分布。扳手材料为钢（杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3），几何参数如图 7-2 所示。

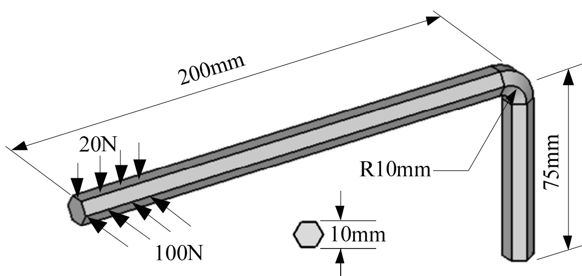


图 7-2 内六角扳手

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 网格划分

1）利用 CAD 软件建立内六角扳手的三维模型，并导入 HyperMesh。

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将扳手底部划分为四边形网格，并放置于 Geometry 组件集，如图 7-3 所示。

3）利用 3D 页面中的 solid map 面板，将扳手划分为六面体网格，并放置于 Wrench 组件集，如图 7-4 所示。

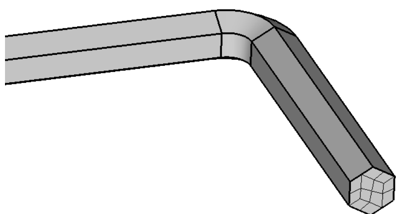


图 7-3　将扳手底部划分为四边形网格

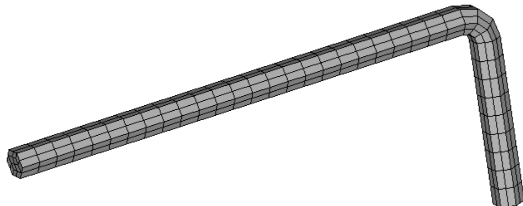


图 7-4　将扳手划分为六面体网格

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。扳手为六面体单元，选用 SOLID185 单元，并设置单元选项 K2=2（Enhanced Strain），即采用增强应变公式方法，以提高计算精度。

STEP 3 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为扳手定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3。

STEP 4 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Wrench 组件集赋予单元和材料。

STEP 5 边界条件定义

利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束扳手底部所有节点的 3 个平动自由度，并将约束载荷放置于 constraints 载荷集。

注意：实体单元节点只有 3 个平动自由度，只需勾选 dof1、dof2 和 dof3 复选框，如图 7-5 所示。

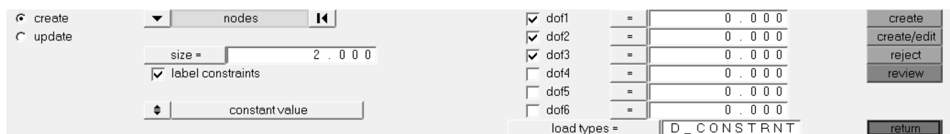


图 7-5　添加自由度约束

STEP 6 载荷定义

1）利用 Analysis 页面中的 forces 面板，在手柄端部节点共施加 20N 的力（顶部），将载荷放置于 force1 载荷集。

2）在手柄端部节点共施加 100N 的力（侧边），将载荷放置于 force2 载荷集，如图 7-6 所示。

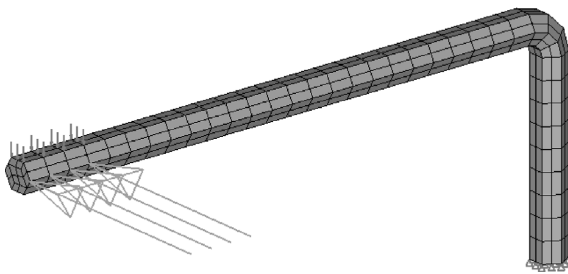


图 7-6　边界条件及载荷

注意：施加力载荷时，应确保所施加的合力为所需值。例如，对手柄端部侧边的 4 个节点各施加 25N，合力就为 100N。

STEP 7 创建载荷步

1）在 Analysis 页面中，利用 load steps 面板创建载荷步 step1，包含 constraints 和 force1 载荷集，模拟向下按压扳手端部。

2）利用 load steps 面板创建载荷步 step2，包含 constraints、force1 和 force2 载荷集，模拟向下按压扳手端部的同时也向侧边推动扳手。

STEP 8 求解控制

在 Analysis 页面中，利用 control cards 面板设置控制卡片。

1）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

2）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 LSSOLVE 按钮，设置最小的载荷步 LSMIN 为 1，最大的载荷步 LSMAX 为 2，载荷步增量 LSINC 为 1，如图 7-7 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 7-7　LSSOLVE 命令

当前的控制卡片如图 7-8 和图 7-9 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 7-8　控制卡片 1

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了两项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
LSSOLVE,1,2,1
```

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 7-9　控制卡片 2

STEP 9 求解并查看结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Wrench_static.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Wrench_static.cdb 文件，并自动求解所有载荷步。图 7-10~图 7-13 为各载荷步的位移云图和应力云图。

由图 7-10 和图 7-11 可知，向下按压扳手端部时，端部变形最大，约为 0.81mm，最大 von Mises 应力发生在扳手的折弯处，约为 38.9MPa。

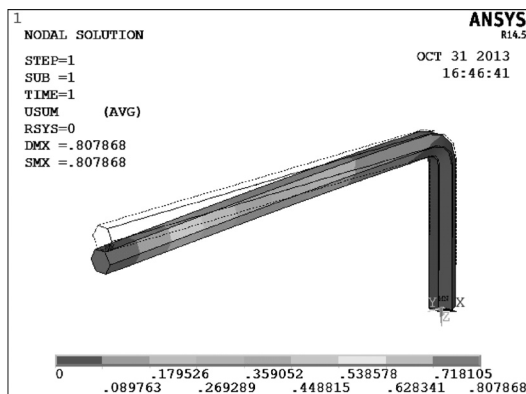


图 7-10　第一载荷步的位移云图

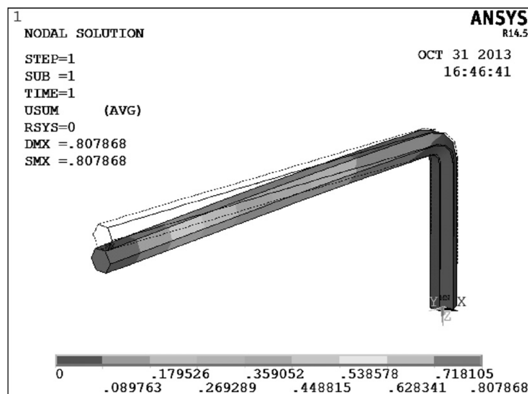


图 7-11　第一载荷步的 von Mises 应力云图

由图 7-12 和图 7-13 可知，在两种载荷作用下，扳手端部变形最大，约为 4.91mm，最大 von Mises 应力发生在扳手的折弯处，约为 227.7MPa。

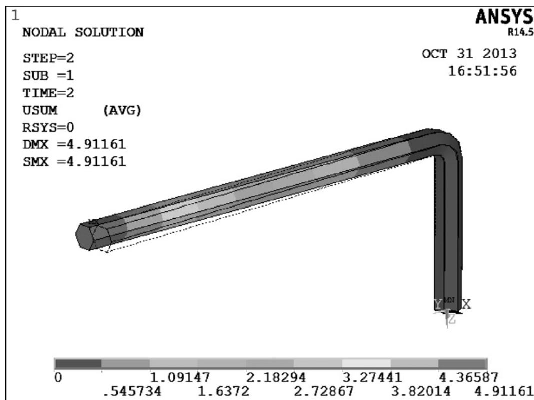


图 7-12　第二载荷步的位移云图

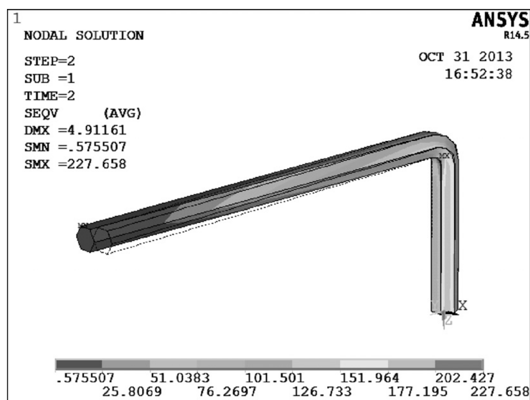


图 7-13　第二载荷步的 von Mises 应力云图

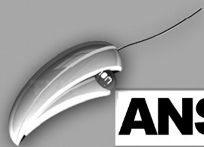
7.4 本章小结



1）静力分析是最简单、最基本的分析类型。本章基于 ANSYS，介绍了静力分析的基本原理和分析步骤，有助于理解 HyperMesh 的建模过程。

2）本章的实例源于 ANSYS 教程，但采用 HyperMesh 完成了除计算和后处理之外的所有步骤。基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

3）除节点位移之外，其余量（如应变、应力等）均是导出量。因此，对于结构分析，位移解更精确。



第8章 模 态 分 析

模态分析用于确定结构的固有频率和振型。固有频率和振型是承受动态载荷结构设计中的重要参数。模态分析也是进行响应谱分析或模态叠加法谐响应分析或瞬态动力学分析必需的前期分析过程。

ANSYS 可以对有预应力的结构进行模态分析，如旋转的涡轮叶片等。ANSYS 还支持循环对称结构的模态分析，可以建立一部分循环对称结构的模型来完成对整个结构的模态分析。

模态分析是一种线性分析技术，只有线性行为是有效的。如果指定了非线性单元，它们将被当做线性的。例如，如果分析中包含了接触单元，则系统取其初始状态的刚度值，并且不再改变此刚度值。对于有预应力的模态分析，接触单元的初始状态为静力分析完成之后的接触状态[15]。

本章主要介绍了模态分析的基本原理和分析步骤，并给出了利用 HyperMesh 进行模态分析和有预应力的模态分析前处理的实例。

8.1 模态分析的求解方法

理论分析与实践均表明，阻尼对结构的固有频率和振型影响不大，所以在求解结构的固有频率和振型时，可以不计阻尼的影响[16]。固有频率和振型是系统的固有属性，与外载荷无关。结构的无阻尼自由振动方程为

$$[M]\{\ddot{U}\}+[K]\{U\}=\{0\} \tag{8-1}$$

式中，$[M]$ 为结构质量矩阵；$[K]$ 为结构刚度矩阵；$\{\ddot{U}\}$ 为节点加速度矢量；$\{U\}$ 为节点位移矢量。

对于线性系统，自由振动为简谐形式

$$\{U\}=\{\phi\}_i\cos\omega_i t \tag{8-2}$$

式中，$\{\phi\}_i$ 为第 i（$i=1,2,\cdots,n$）阶固有频率对应的特征向量，即振型；ω_i 为第 i 阶固有圆频率（单位为 rad/s）；t 为时间。

将式（8-2）代入式（8-1），有

$$([K]-\omega_i^2[M])\{\phi\}_i=\{0\} \tag{8-3}$$

式（8-3）有非零解（$\{\phi\}_i$ 不可能全部为零）的条件为小括号内的行列式必须为零，即满足特征方程

$$\left|[K]-\omega_i^2[M]\right|=0 \tag{8-4}$$

由式（8-4）可解得特征值 ω_i^2。将 ω_i^2 代入式（8-3），则可求得与其对应的特征向量 $\{\phi\}_i$。

ANSYS 实际输出的模态频率是自然频率 f（单位为 Hz），且

$$f=\frac{\omega}{2\pi} \tag{8-5}$$

ANSYS 默认将振型 $\{\phi\}_i$ 相对于质量矩阵归一化

$$\{\phi\}_i^T[M]\{\phi\}_i = 1 \tag{8-6}$$

许多数值方法可用于求解式（8-3）。ANSYS 14.5 提供了 6 种方法，分别是 Block Lanczos、PCG Lanczos、Supernode、Unsymmetric、Damped 和 QR damped。前 3 种方法使用最广泛，详细介绍如下。

（1）Block Lanczos（分块 Lanczos 法）

分块 Lanczos 法适用于大型对称特征值问题。这种方法采用稀疏矩阵求解器，是默认的求解器。

（2）PCG Lanczos

PCG Lanczos 法适用于非常大的对称特征值问题（50 万自由度以上），在求解最低阶模态时尤其有用。这种方法采用 PCG 迭代求解器。

（3）Supernode（超节点法）

超节点法适用于一次性求解高达 10 000 阶的模态，可用于模态叠加法或 PSD 分析的模态提取，以求解结构的高频响应。

通常，可让 ANSYS 自动选择求解器，即采用默认设置：Block Lanczos。

8.2 模态分析的基本步骤

8.2.1 建立有限元网格模型

根据实际问题的特点，对所分析的问题进行初步计划；忽略对结构刚度影响不大的细节特征，如圆角、倒角和小孔等，建立简化的 CAD 模型，并对其划分有限元网格；定义单元类型、单元选项、实常数、截面特性和材料特性。

在进行模态分析时，要注意如下内容：

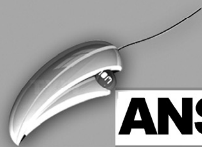
1）在模态分析中只有线性行为是有效的。如果指定了非线性单元，它们将被当做是线性的。例如，如果分析中包含了接触单元，则系统取其初始状态的刚度值，并且不再改变此刚度值。对于有预应力的模态分析，接触单元的初始状态为静力分析完成之后的接触状态。

2）材料特性可以是线性的，各向同性的或正交各向异性的，恒定的或与温度相关的。非线性材料特性将被忽略。

3）在模态分析中必须指定杨氏模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量）。

8.2.2 施加边界条件

模态分析中唯一有效的“载荷”是零位移约束。如果在某个自由度（DOF）处指定了非零位移约束，ANSYS 将以零位移约束替代在该自由度处的设置。在未加约束的方向上，ANSYS 将计算刚体运动（零频）以及高阶（非零频）自由体模态。可以施加除位移约束之外的其他载荷，但它们将被忽略。



8.2.3 设置求解控制选项

进行模态分析时，首先应定义分析类型为模态分析（ANTYPE,MODAL），再通过模态分析求解控制对话框来设置求解选项，如图 8-1 所示。一般地，仅须指定模态的提取阶数和设置模态扩展选项，其余采用默认设置即可。图 8-1 指定模态的提取阶数和扩展阶数都为 12。图 8-2 为 Block Lanczos Method 对话框，通常保持默认设置。

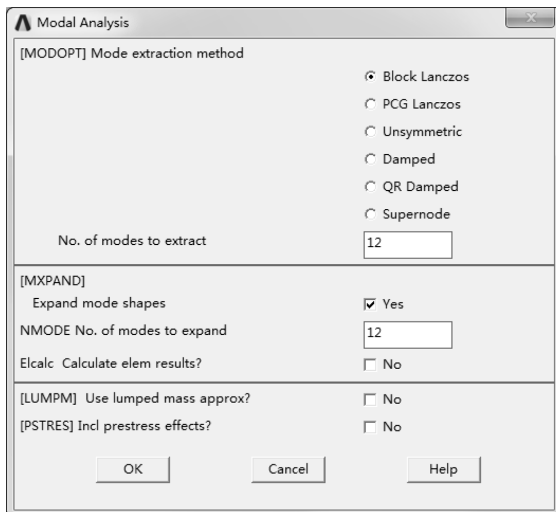


图 8-1 Modal Analysis 对话框

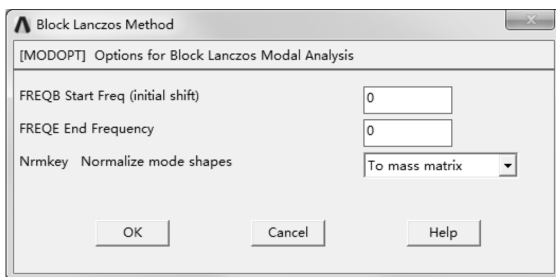


图 8-2 Block Lanczos Method 对话框

8.2.4 求解

在执行求解命令之前，可将当前模型进行备份，以便将来恢复模型。

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

8.2.5 查看结果

模态分析的结果保存于结构分析结果文件（Jobname.rst）中，包括以下内容：

1）固有频率。

2）模态振型。

3）相对应力和力分布（如果需要）。

用户可以使用通用后处理器 POST1 进行后处理，查看结果。

8.3 有预应力的模态分析

有预应力的模态分析用于计算有预应力结构的固有频率和振型，如旋转的涡轮叶片的模态分析。除了首先要通过进行静力分析把预应力加到结构上之外，有预应力的模态分析的过程和常规模态分析基本相同。

8.3.1 静力分析

在静力分析中，应开启预应力效应，勾选 Calculate prestress effects 复选框（PSTRES,ON），如图 8-3 所示。

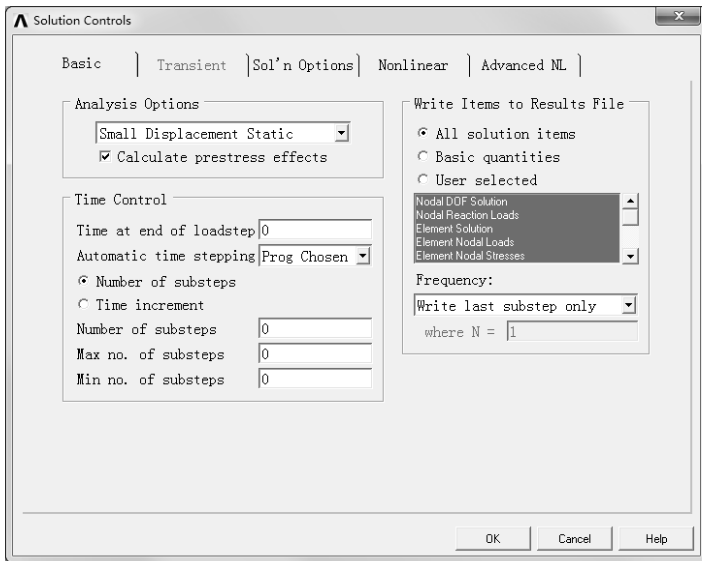


图 8-3　在静力分析中开启预应力效应

8.3.2 模态分析

在模态分析中，也应开启预应力效应，勾选 Incl prestress effects，如图 8-4 所示。图 8-4 指定模态的提取阶数和扩展阶数都为 12。

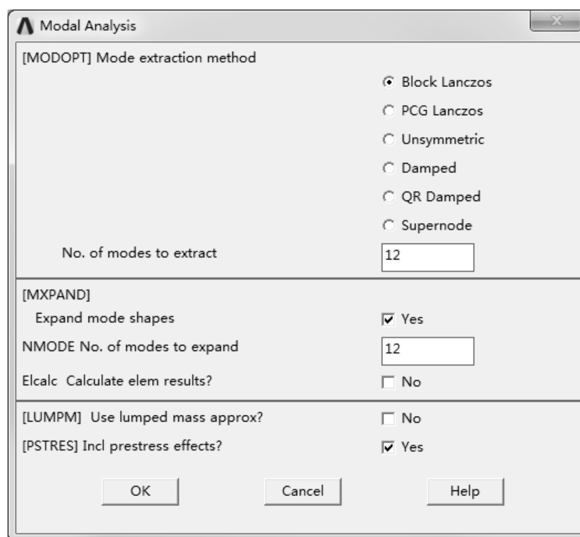


图 8-4 在模态分析中开启预应力效应

8.4 模态分析实例

本实例对一个飞机模型的机翼进行模态分析，以确定机翼的模态频率和振型。机翼沿长度方向轮廓一致，横截面由直线和样条曲线组成，几何参数如图 8-5 所示，坐标单位为 mm。机翼由低密度聚乙烯（杨氏模量为 260MPa，泊松比为 0.3，密度为 920kg/m^3）制成，一端固定在机体上，另一端为自由端。

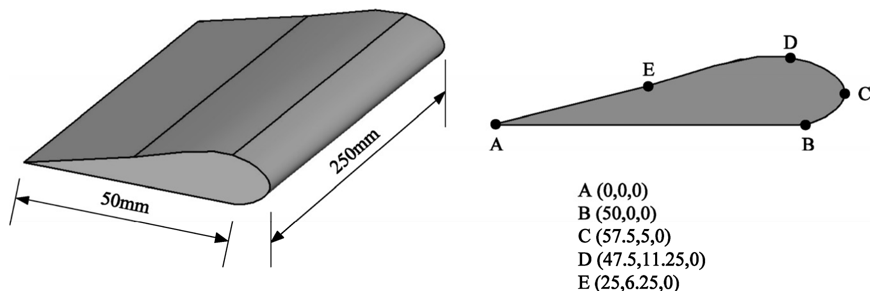


图 8-5 飞机模型的机翼简图

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 网格划分

1）利用 CAD 软件建立机翼的三维模型，并导入 HyperMesh。

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将机翼端面划分为以四边形为主的面网格，并放置于 Geometry 组件集，如图 8-6 所示。

3）利用 3D 页面中的 solid map 面板，将机翼划分为以六面体为主的实体网格，并放置于 Airplane_wing 组件集，如图 8-7 所示。

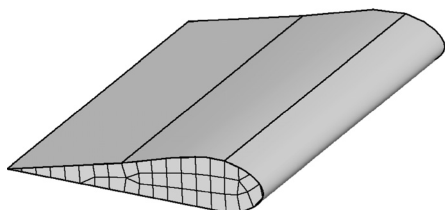


图 8-6　机翼端面的面网格

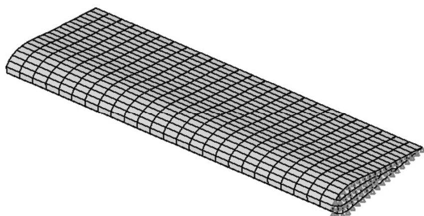


图 8-7　机翼的实体网格（含边界条件）

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。机翼以六面体单元为主，选用 SOLID185 单元，并设置单元选项 K2=2（Enhanced Strain），即采用增强应变公式方法，以提高计算精度。

STEP 3 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为机翼定义材料，杨氏模量 EX 为 260MPa，泊松比 NUXY 为 0.3，密度 DENS 为 9.2E−10ton/mm^3。

STEP 4 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Airplane_wing 组件集赋予单元和材料。

STEP 5 边界条件定义

利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束机翼一端所有节点的 3 个平动自由度（见图 8-7），并将约束载荷放置于 constraints 载荷集。

注意：实体单元节点只有 3 个平动自由度，只需勾选 dof1、dof2 和 dof3 复选框，如图 8-8 所示。



图 8-8　添加自由度约束

STEP 6 求解控制

在 Analysis 页面中，利用 control cards 面板设置控制卡片。

1）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

2）单击 ANTYPE 按钮，将 type 由 STATIC 切换为 MODAL，定义分析类型为模态分析，如图 8-9 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

3）单击 MODOPT 按钮，确认 method 为 LANB，将 nmode 设置为 6，其余选项保持默认设置，如图 8-10 所示。MODOPT 命令指定了模态的提取方法为 Block Lanczos，模态的提取阶数为 6。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 8-9　ANTYPE 命令



图 8-10　MODOPT 命令

4）单击 EQSLV 按钮，将 Lab 由 FRONT 切换为 SPARSE，指定方程求解器为稀疏矩阵求解器，如图 8-11 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 MXPAND 按钮，将 NMODE 设置为 6，将 Elcalc 切换为 NO，如图 8-12 所示。MXPAND 命令指定了模态的扩展阶数为 6，不计算单元结果。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 8-11　EQSLV 命令



图 8-12　2MXPAND 命令

6）单击 LUMPM 按钮，保持默认设置，采用一致质量矩阵，如图 8-13 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

7）单击 PSTRES 按钮，保持默认设置，不考虑预应力，如图 8-14 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 8-13　LUMPM 命令

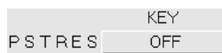


图 8-14　PSTRES 命令

8）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

当前的控制卡片如图 8-15 和图 8-16 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 8-15　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 8-16　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 8 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,MODAL,NEW
MODOPT,LANB,6,0,0,,OFF
```

```
EQSLV,SPARSE
MXPAND,6,,,NO,0.001
LUMPM,OFF
PSTRES,OFF
SOLVE
```

STEP 7 求解并查看结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Airplane_wing_modal.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Airplane_wing_modal.cdb 文件，并自动进行模态分析。表 8-1 为机翼的前 6 阶模态频率，图 8-17~图 8-22 为机翼的前 6 阶模态振型。

表 8-1　机翼的前 6 阶模态频率

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
频率/Hz	12.598	60.498	77.943	125.31	214.37	335.54

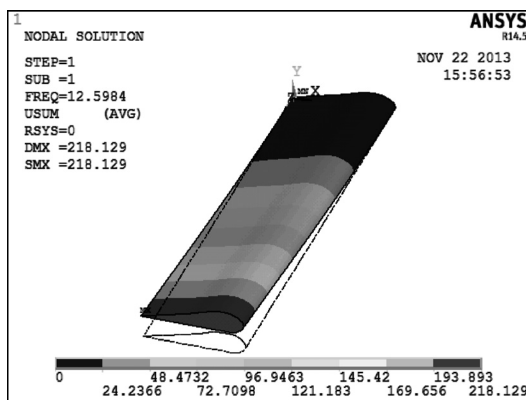


图 8-17　第 1 阶模态振型

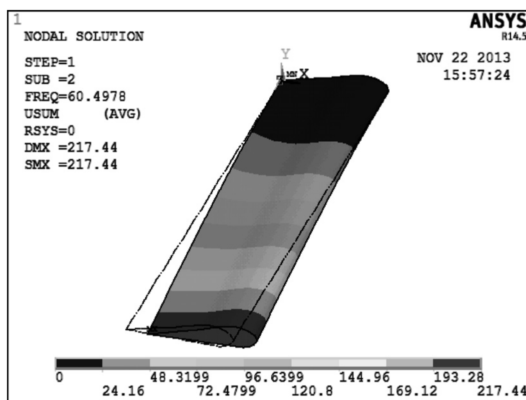


图 8-18　第 2 阶模态振型

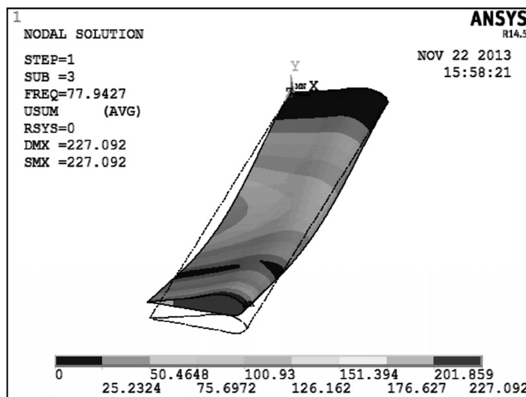


图 8-19　第 3 阶模态振型

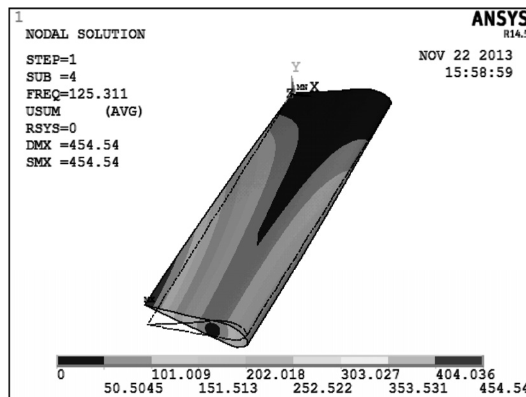


图 8-20　第 4 阶模态振型

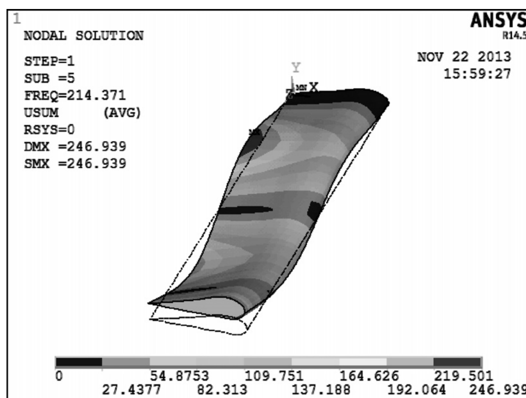


图 8-21　第 5 阶模态振型

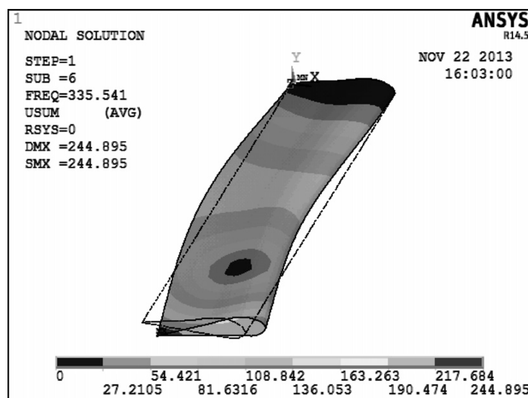


图 8-22　第 6 阶模态振型

8.5　有预应力的模态分析实例

本实例对一根钢丝（琴弦）进行有预应力的模态分析。横截面形状为圆形（直径 d=0.25mm）的钢丝，在 F_1=30N 的拉力作用下绷紧于两个刚性铰支点间，如图 8-23 所示。求钢丝在 X-Y 平面内的预应力模态，并与无预应力的模态进行对比。

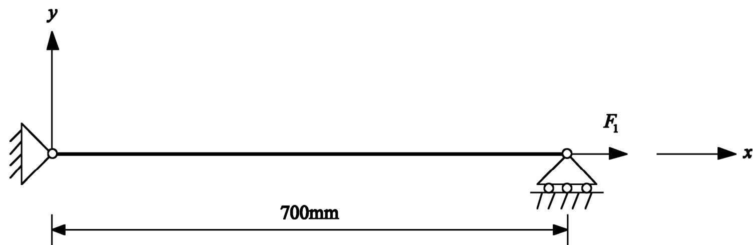


图 8-23　有预应力的钢丝

钢丝的材料特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 网格划分

本例的网格模型较简单，可利用 HyperMesh 直接建模。

1）在 Geom 页面中选择 nodes 面板，创建钢丝的两个端点，坐标分别为（0，0，0）和（700，0，0）。

2）在 1D 页面中选择 line mesh 面板，按图 8-24 所示设置网格划分参数。利用钢丝的两个端点划分梁单元，单元长度为 25mm。由于钢丝横截面为圆形，方向节点的选择不重要，可按默认设置，即 auto。

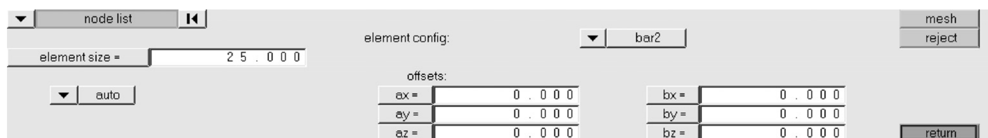


图 8-24　line mesh 面板

3）将生成的梁单元放置于 Steel_wire 组件集，如图 8-25 所示。

图 8-25　钢丝的有限元网格（28 个梁单元）

STEP② 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设置单元和单元选项。钢丝为梁单元，选用 BEAM188 单元，并设置单元选项 K3=3（Cubic Form），即设置单元形函数为三次式，以获取较高的计算精度。

STEP③ 定义梁截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Circular_sec，Section type 为 BEAM，Sub section type 为 CSOLID，勾选 Define by HyperBeam 复选框，并选择 New section 单选按钮，如图 8-26 所示。

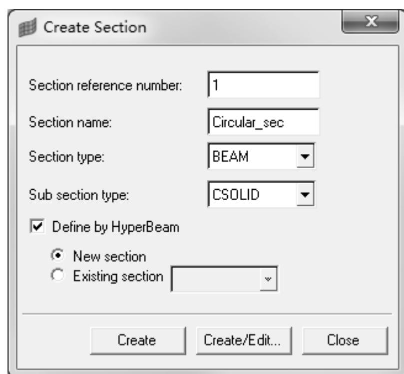


图 8-26　Create Section 对话框

3）单击 Creat/Edit 按钮，弹出 HyperBeam 数据浏览器。在左下方的 Parameters Definition 中，设置 Radius（r）=0.125，表示圆截面半径为 0.125mm。

4）执行菜单命令 File→Exit，退出 HyperBeam 数据浏览器，返回 Create Section 对话框。

5）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

6）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP④ 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为钢丝定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3，密度 DENS 为 7.85E−9t/mm^3。

STEP⑤ 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Steel_wire 组件集赋予单元、横截面和材料。

STEP⑥ 边界条件定义

1）利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束钢丝左端节点的 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY 自由度，模拟左端铰支，并将约束载荷放置于 constraints1 载荷集中。

2）约束钢丝右端节点的 UY、UZ、ROTX、ROTY 自由度，并将约束载荷放置于 constraints2 载荷集中。右端节点需要施加预紧拉力 F_1，故需要放开 UX 自由度。

3）约束其余所有节点的 UZ、ROTX、ROTY 自由度，并将约束载荷放置于 constraints3 载荷集中。

说明：梁单元节点具有 6 个自由度。在 HyperMesh 中，dof1、dof2、dof3、dof4、dof5、dof6 分别表示 ANSYS 中的 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ。

STEP 7 载荷定义

利用 Analysis 页面中的 forces 面板，在钢丝右端节点施加拉力 30N，方向为 *X* 正向，并将载荷放置于 force_x 载荷集中。边界条件及载荷定义如图 8-27 所示。



图 8-27 边界条件及载荷定义

STEP 8 创建静力分析载荷步

对于有预应力的模态分析，需要先进行静力分析，再进行模态分析。

在 Analysis 页面中，利用 load steps 面板创建载荷步 step1，包含 constraints1、constraints2、constraints3 和 force_x 载荷集，模拟绷紧钢丝。

STEP 9 求解控制

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置，定义分析类型为静力分析，如图 8-28 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 PSTRES 按钮，将 KEY 由 OFF 切换为 ON，激活预应力效应，如图 8-29 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 8-28 ANTYPE 命令



图 8-29 PSTRES 命令

5）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

当前的控制卡片如图 8-30 和图 8-31 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 8-30 控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 8-31　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 4 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
PSTRES,ON
SOLVE
```

STEP 10 静力分析

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Steel_wire_static.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Steel_wire_static.cdb 文件，并自动进行静力分析。图 8-32 为钢丝的位移云图。由图 8-32 可知，在拉力 F_1 的作用下，钢丝右端被拉伸约 2.04mm。

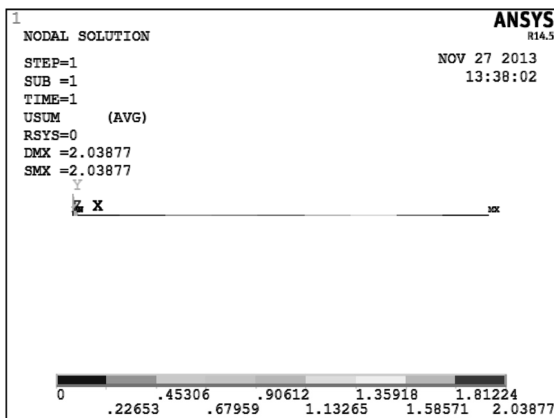


图 8-32　钢丝的位移云图

STEP 11 模态分析

完成静力分析之后，必须借助 ANSYS 界面才能完成后续的模态分析。

1）退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）修改边界条件及载荷。在 HyperMesh 中，已经约束钢丝右端节点的 UY、UZ、ROTX、ROTY 自由度。为模拟右端铰支，利用 ANSYS 添加该节点的 UX 自由度约束，并删除作用于该节点的拉力 F_1。

说明：静力分析结果显示，钢丝右端节点被拉伸约 2.04mm，相对钢丝长度（700mm）为小量。将右端节点的 UX 设置为零（模态分析只能施加零值的自由度约束）并不会显著影响模态的计算结果。此外，模态分析将忽略力载荷，但可包含静力分析得到的预应力，故可将拉力 F_1 删除。

3）定义新的分析类型为模态分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，其中，New Analysis 对话框如图 8-33 所示。

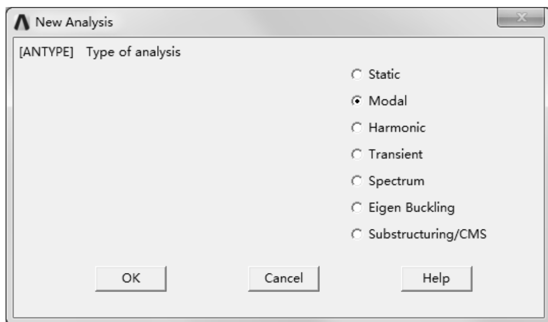


图 8-33 New Analysis 对话框

4）设置模态分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options。提取并扩展前 6 阶模态，为便于观察梁单元的模态变形，将计算单元结果（Calculate elem results）选项打开。为包含静力分析中的预应力，将包含预应力效应选项打开（即勾选 [PSTRES]Incl prestress effects 复选框），如图 8-34 所示。

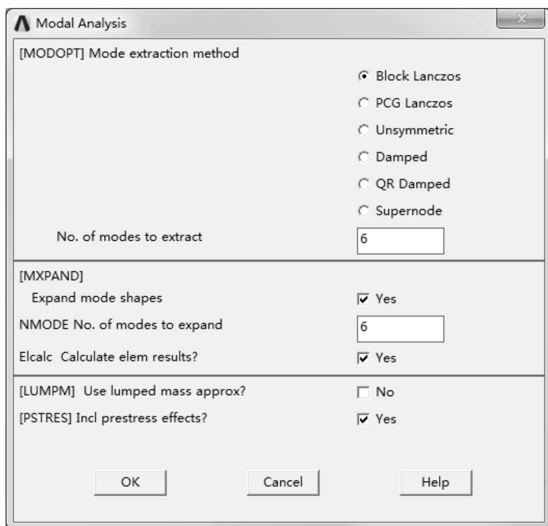


图 8-34 Modal Analysis 对话框

5）设置 Block Lanczos 方法求解选项。单击图 8-34 中的 OK 按钮，弹出 Block Lanczos Method 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮，如图 8-35 所示。

6）模态分析求解。GUI 方式为 Main Menu→Solution→Solve→Current LS。

STEP 12 查看模态分析结果

表 8-2 为钢丝的前 6 阶模态频率对比。图 8-36~图 8-41 为各阶预应力模态振型。对于本例，无预应力的模态振型与有预应力的模态振型完全相同。

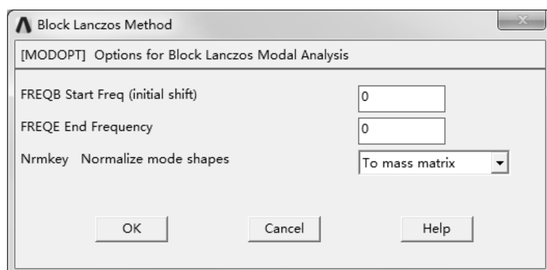


图 8-35 Block Lanczos Method 对话框

表 8-2 钢丝的前 6 阶模态频率对比

阶 数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
有预应力频率/Hz	199.38	398.78	598.21	797.69	997.24	1196.9
无预应力频率/Hz	1.0356	4.1425	9.3205	16.570	25.890	37.282

表 8-2 中的数据显示，预应力非常显著地提高了模态频率，即增强了钢丝的横向刚度，这种效应就是应力刚化。

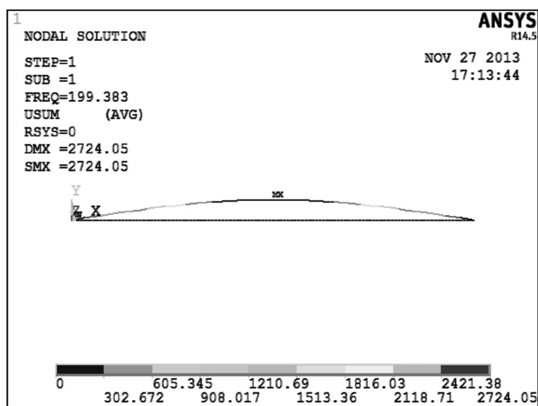


图 8-36 第 1 阶预应力模态振型

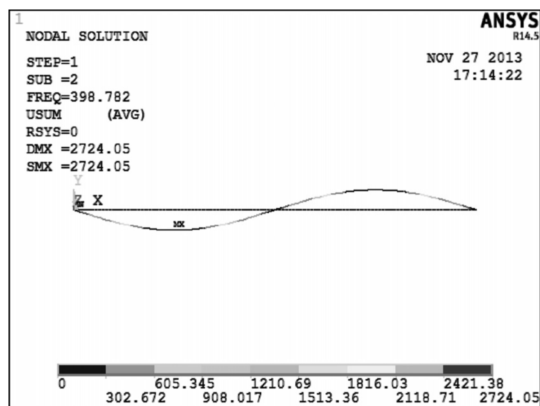


图 8-37 第 2 阶预应力模态振型

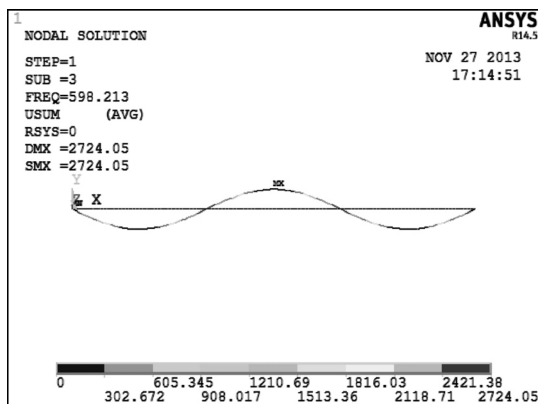


图 8-38 第 3 阶预应力模态振型

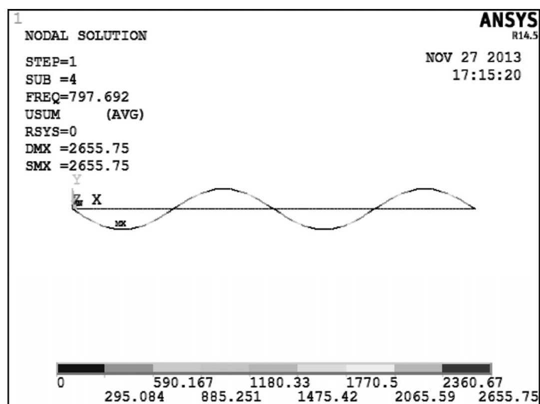


图 8-39 第 4 阶预应力模态振型

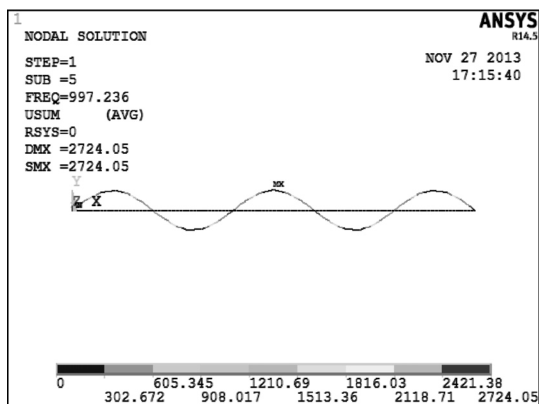


图 8-40 第 5 阶预应力模态振型

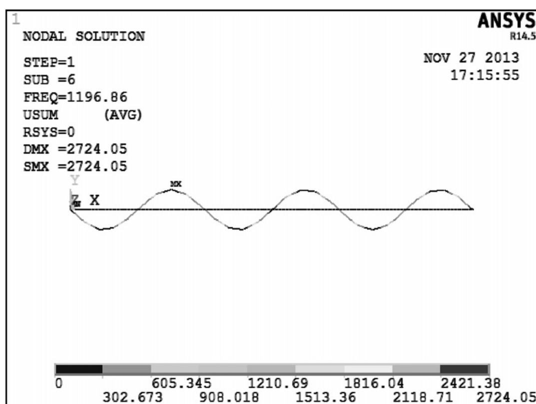


图 8-41 第 6 阶预应力模态振型

8.6 本章小结

1）模态分析是最简单、最基本的动力分析类型。本章基于 ANSYS，介绍了模态分析的基本原理和分析步骤，有助于理解 HyperMesh 的建模过程。

2）本章的两个实例源于 ANSYS 教程。对于第一个实例（无预应力的模态分析），采用 HyperMesh 完成了除计算和后处理之外的所有步骤。对于第二个实例（有预应力的模态分析），采用 HyperMesh 完成了静力分析设置，后续的模态分析必须借助 ANSYS 界面才能完成。

3）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

4）模态分析主要反映结构的刚度特性。建立有限元模型时，可忽略对结构刚度影响不大的细节特征，如圆角、倒角、小孔等。

5）低阶模态对网格密度要求较低，但若要分析结构的高阶模态，则应划分密度较高的有限元网格。

6）对于模态分析，不建议采用局部模型，应尽可能建立完整的结构模型，虽然计算量较大，但不易出错。

第 9 章　谐响应分析

模态分析可用于确定结构的固有频率和振型，但模态分析计算的位移（即振型）是关于质量矩阵或单位矩阵归一化得到的相对值。为了获得结构在固有频率处的实际响应，应进行谐响应分析。谐响应是结构在周期载荷作用下产生的周期响应。谐响应分析使设计人员能预测结构的持续动力特性，从而使设计人员能够验证其设计能否克服共振、疲劳及其他受迫振动引起的有害效果。

谐响应分析计算结构在不同频率下的响应并得到一些响应值（通常是位移）对频率的曲线，从这些曲线上可以找到“峰值”响应，并进一步观察峰值频率对应的应力。该技术只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑发生在激励开始时的瞬态振动。图 9-1 为典型的谐响应系统及动力学响应。

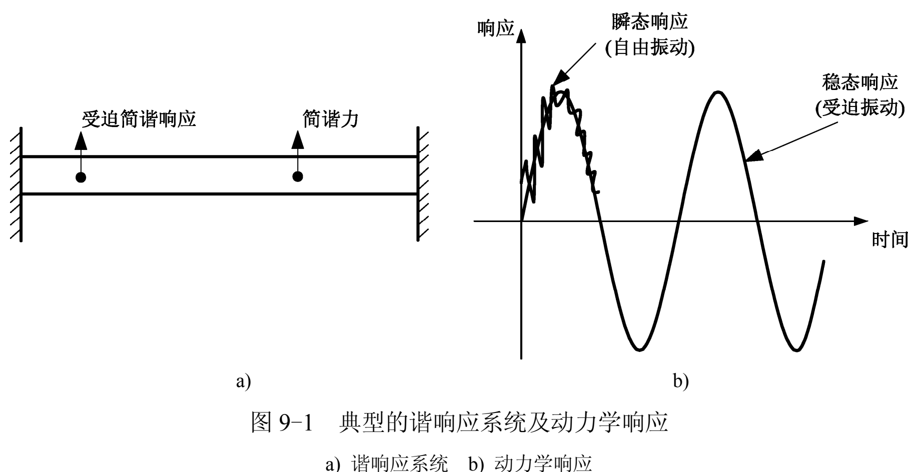


图 9-1　典型的谐响应系统及动力学响应

a) 谐响应系统　b) 动力学响应

谐响应分析是一种线性分析技术，任何非线性特性，如塑性，即使定义了，也将被忽略。分析中可以包含非对称系统矩阵，如流—固耦合系统。谐响应分析也可以分析有预应力的结构，如小提琴的弦（假定简谐力比预加的拉伸力小得多）等。

本章主要介绍了谐响应分析的基本原理和分析步骤，给出了利用 HyperMesh 进行谐响应分析和有预应力的谐响应分析前处理的实例，并解释了谐响应分析的结果。

9.1　谐响应分析的求解方法

谐响应分析求解结构动力学方程

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{F\} \tag{9-1}$$

式中，$[M]$ 为结构质量矩阵；$[C]$ 为结构阻尼矩阵；$[K]$ 为结构刚度矩阵；$\{\ddot{U}\}$ 为节点加速度矢量；$\{\dot{U}\}$ 为节点速度矢量；$\{U\}$ 为节点位移矢量；$\{F\}$ 为力矢量。

对于受迫振动的稳态响应，结构的所有节点均以相同的频率（激振频率）振动。由于存在阻尼，各节点的相位可以不同。因此，节点位移可表达为

$$\{U\}=\{U_{\max}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}\}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{9-2}$$

式中，$U_{\max}$ 为位移幅值；i 为虚数，且 $\mathrm{i}^2=-1$；ω 为圆频率（单位为 rad/s）；t 为时间；ϕ 为位移相位角（单位为 rad）；$\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}$ 和 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$ 为简谐振动的复数表达形式

$$\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}=\cos\phi+\mathrm{i}\sin\phi \tag{9-3}$$

$$\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}=\cos\omega t+\mathrm{i}\sin\omega t \tag{9-4}$$

将式（9-2）改写为

$$\{U\}=(\{U_1\}+\mathrm{i}\{U_2\})\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{9-5}$$

式中，$\{U_1\}=\{U_{\max}\cos\phi\}$，为位移实部；$\{U_2\}=\{U_{\max}\sin\phi\}$，为位移虚部。

同理，力矢量也可表达为式（9-6）的形式

$$\{F\}=(\{F_1\}+\mathrm{i}\{F_2\})\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{9-6}$$

式中，$\{F_1\}=\{F_{\max}\cos\varphi\}$，为力实部。$F_{\max}$ 为力幅值；φ 为力相位角（单位为 rad）；$\{F_2\}=\{F_{\max}\sin\varphi\}$，为力虚部。

将式（9-5）和式（9-6）代入式（9-1），并消去 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}$，得

$$([K]-\omega^2[M]+\mathrm{i}\omega[C])(\{U_1\}+\mathrm{i}\{U_2\})=\{F_1\}+\mathrm{i}\{F_2\} \tag{9-7}$$

式（9-7）就是谐响应分析动力学方程。ANSYS 14.5 提供了两种方法求解式（9-7），即完全法和模态叠加法，分别介绍如下。

（1）完全法

完全法是一种通用的方法，它采用完整的系统矩阵计算谐响应（没有矩阵缩减）。完全法的优点是：

1）容易使用，因为不必关心如何选取振型。

2）使用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵的近似。

3）允许有非对称矩阵，这种矩阵在声学或轴承问题中很典型。

4）用单一处理过程计算出所有的位移和应力。

5）允许定义所有类型的载荷：节点力、外加的（非零）位移和单元载荷（压力和温度）。

6）允许在实体模型上定义载荷。

（2）模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（特征向量）乘上因子并求和来计算结构的响应。它的优点是：

1）对于许多问题，模态叠加法比完全法更快且开销小。

2）模态分析中施加的单元载荷可以通过 LVSCALE 命令用于谐响应分析。

3）可以使解按结构的固有频率聚集，便可得到更平滑、更精确的响应曲线。

4）允许考虑振型阻尼（阻尼系数为频率的函数）。

完全法和模态叠加法均存在共同的局限性：

1）所有载荷必须随时间按正弦规律变化。

2）所有载荷必须有相同的频率。

3）不允许有非线性特性。

4）不计算瞬态效应。

可以通过瞬态动力学分析来克服这些限制，此时应将简谐载荷表示为时间历程的载荷函数，详见第 10 章。



尽管完全法需要消耗更多的计算资源，但其功能强大，且方便使用。本书主要介绍基于完全法的谐响应分析。

9.2 谐响应分析的基本步骤

9.2.1 建立有限元网格模型

根据实际问题的特点，对所分析的问题进行初步计划；建立反映真实物理情况的 CAD 模型或简化的 CAD 模型，并对其划分有限元网格；定义单元类型、单元选项、实常数、截面特性和材料特性。

在进行谐响应分析时，要注意如下内容：

1）材料特性可以是线性的、各向同性的或各向异性的、恒定的或与场相关的。非线性材料特性将被忽略。

2）必须指定杨氏模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量）。

3）只有线性行为是有效的。如果指定了非线性单元，它们将被当做是线性的。例如，如果分析中包含了接触单元，则系统取其初始状态的刚度值，并且不再改变此刚度值。对于有预应力的谐响应分析，接触单元的初始状态为静力分析完成之后的接触状态。

9.2.2 模态分析（可选）

尽管基于完全法的谐响应分析无需进行模态分析，但峰值响应发生在激励的频率与结构的固有频率相等时。所以在进行谐响应分析之前，建议先进行模态分析，以确定结构的固有频率和振型，相关内容详见第 8 章。

9.2.3 设置求解控制选项

1）进行谐响应分析时，首先应定义分析类型为谐响应分析（ANTYPE,HARMIC），再通过谐响应分析求解控制对话框来设置求解选项，如图 9-2 和图 9-3 所示。一般地，采用默认设置即可。

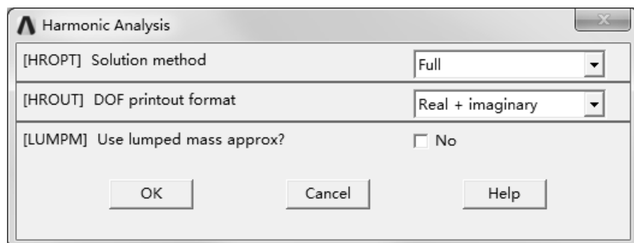


图 9-2 Harmonic Analysis 对话框

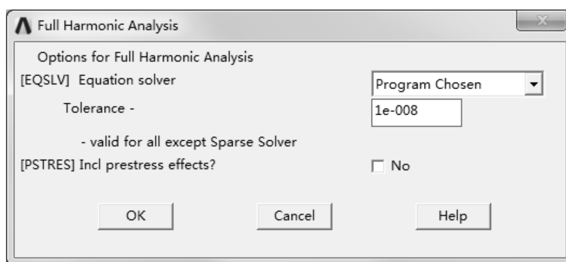


图 9-3 Full Harmonic Analysis 对话框

2）基于模态分析的结果，设置载荷步选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load StepOpts→Time/Frequenc→Freq and Substps。如图 9-4 所示为 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框。图中指定了强制激振频率范围为 0~10Hz；子步数为 20，即需要求解 0.5Hz，1Hz，1.5Hz，…，10Hz 的结果；载荷加载方式为阶跃，表示在强制频率范围内载荷的幅值保持为恒定值。

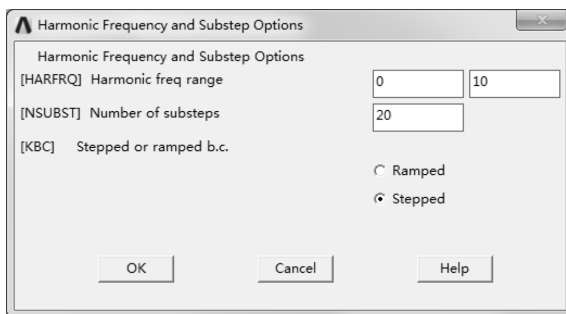


图 9-4 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框

3）应指定某种形式的阻尼，否则在共振频率处的响应将无限大。GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Damping。如图 9-5 所示为 Damping Specifications 对话框。

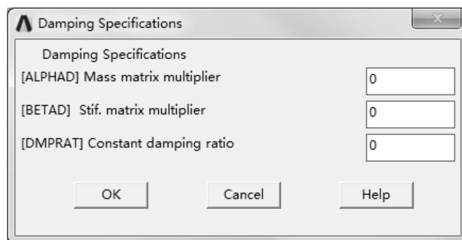


图 9-5 Damping Specifications 对话框

ALPHAD 和 BETAD 指定的是和频率相关的阻尼系数，而 DMPRAT 指定的是对所有频率为恒定值的阻尼比。关于阻尼的详述，参见第 10.4.4 节。

注意：如果在完全法的谐响应分析中没有指定阻尼，ANSYS 将采用零阻尼。

9.2.4 施加边界条件及载荷

通常，在 ANSYS 中应用的载荷形式，如约束（包括强制位移）、力/力矩、表面载荷、体

积载荷和惯性载荷，在谐响应分析中都可以应用。

根据定义，谐响应分析假定所有载荷随时间按简谐（正弦）规律变化。指定一个完整的简谐载荷需要输入 3 条信息：Amplitude（幅值，F_{max}）、Phase angle（相位角，φ）和 Forcing frequency range（强制频率范围）。简谐载荷可视为一个绕原点做等速圆周运动的点在水平轴上的投影，如图 9-6 所示。

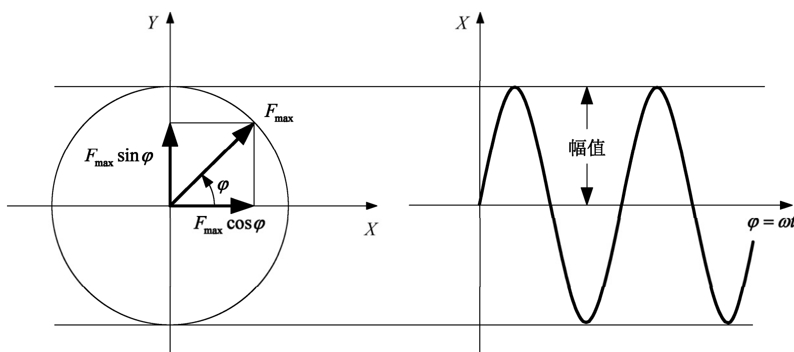


图 9-6　简谐载荷示意图

当同时要定义多个相互间存在相位差的简谐载荷时，必须分别指定幅值和相位角。ANSYS 不能直接输入幅值和相位角，而是输入实部 $F_{max}\cos\varphi$ 和虚部 $F_{max}\sin\varphi$ 分量，而强制频率范围在图 9-4 所示对话框中设置。

一般地，若各载荷不存在相位差，则可认为 φ=0，只需要设置载荷的实部为幅值 F_{max}。特别地，压力、表面载荷和体积载荷只能设置相位角为零，即不能定义载荷的虚部。

9.2.5 求解

在执行求解命令之前，可将当前模型进行备份，以便将来恢复模型。

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

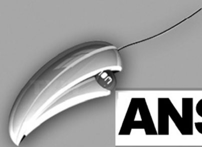
Main Menu→Solution→Solve→Current LS

9.2.6 查看结果

谐响应分析的结果数据与静力分析基本相同。不同的是，如果在结构中指定了阻尼，结构响应与激励载荷之间不再同步，所有结果将以复数形式，即实部和虚部进行存储。如果施加的载荷之间不同步（存在初始相位差），同样也会产生复数结果。

可以用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 进行后处理，查看计算结果。后处理的一般顺序是，首先用 POST26 找到临界频率——模型中所关注的点产生最大位移（或应力）时的频率，然后用 POST1 在这些临界强制频率处处理整个模型。

POST26 用于观察模型中指定点在整个频率范围内的结果，可得到指定节点的真实结果，即幅值和相位。



POST1 用于观察整个模型在指定频率点的结果。谐响应分析结果的每个子步以实部和虚部分别存储。可以用 SET 命令来读入结果，但它只能读入实部或者虚部，不能同时将两者都读入。结果的实际大小由实部和虚部的 SRSS 值（二次方和的二次方根）给出。若须查看整个结构在某激振频率下的响应极值，可输入命令：

```
HRCPLX,LOADSTEP,SUBSTEP,360
```

9.3 有预应力的谐响应分析

有预应力的谐响应分析用于计算有预应力结构的谐响应。除了首先要通过进行静力分析把预应力加到结构上之外，有预应力的谐响应分析过程和常规谐响应分析基本相同。

9.3.1 静力分析

在静力分析中，应开启预应力效应，勾选 Calculate prestress effects 复选框（PSTRES,ON），如图 9-7 所示。

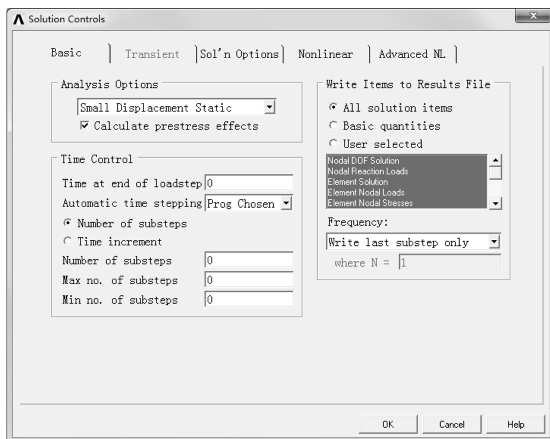


图 9-7　在静力分析中开启预应力效应

9.3.2 谐响应分析

在完全法的谐响应分析中，也应开启预应力效应，勾选“[PSTRES]Incl prestress effects?”右侧的 Yes 复选框，如图 9-8 所示。

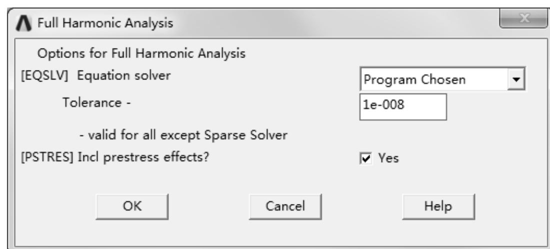


图 9-8　在谐响应分析中开启预应力效应

需要注意的是，谐响应分析假定所有载荷随时间按简谐（正弦）规律变化，因此，应删除静力分析中的预应力载荷，只保留谐响应分析需要的载荷。

9.4 谐响应分析实例

如图 9-9 所示的工作台-电动机系统，当电动机工作时由于转子偏心引起电动机发生简谐振动，这时电动机的旋转偏心载荷是一个简谐激励，计算结构在该激励下的响应。已知条件如下。

1）工作台面板：长=2m（X 方向），宽=1m（Y 方向），厚=0.02m（Z 方向）。

2）工作台 4 条腿的梁几何特性：长=1m（Z 方向），截面宽度=0.01m（X 方向），截面高度=0.02m（Y 方向）。

3）电动机质量 m=100kg，质心位于工作台台面正上方 0.1m。

4）简谐激励 F_x、F_z 的幅值为 100 N，F_z 落后 F_x90° 的相位角。

5）电动机转动频率范围为 0~10Hz。

6）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 2.1×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

7）假定结构的恒定阻尼比为 0.02。

8）本例采用国际单位制。

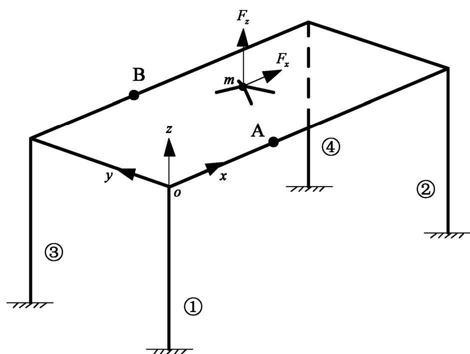


图 9-9　工作台—电动机示意图

STEP 1 网格划分

本例的几何模型较简单，可利用 HyperMesh 建立面和线的几何模型，再划分网格。

1）灵活利用 Geom 页面中的 nodes、lines 和 surfaces 面板，建立工作台台面和支腿的几何模型，并放置于 Geometry 组件集，如图 9-10 所示。

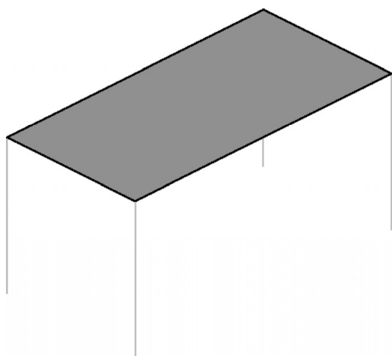


图 9-10　工作台台面和支腿的几何模型

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将工作台台面划分为边长为 0.1m 的四边形单元（共 200 个），并放置于 Table 组件集。

3）利用 1D 页面中的 line mesh 面板，按图 9-11 所示设置网格划分参数，将每个支腿分别划分为 10 个梁单元，并放置于 Leg 组件集。需要注意的是，方向节点（direction node）应选择 z direction，如图 9-9 所示，编号为①和②的支腿应选择 A 点作为方向节点，编号为③和④的支腿应选择 B 点作为方向节点。

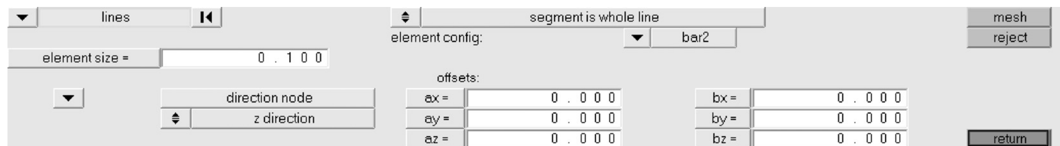


图 9-11　line mesh 面板

4）利用 Tool 页面中的 translate 面板，将位于台面中心的节点向 *z* 方向复制并平移 0.1m，生成临时节点，用于建立质量单元。

5）利用 1D 页面中的 masses 面板，在临时节点处创建质量单元，并放置于 Mass 组件集。

6）利用 1D 页面中的 rigids 面板，按图 9-12 所示设置各选项，采用刚性连接 CERIG 将质量单元与台面的 4 个节点连接，并放置于 CERIG 组件集。其中，质量单元为 independent node，台面的 4 个节点为 dependent nodes，并耦合 6 个自由度。

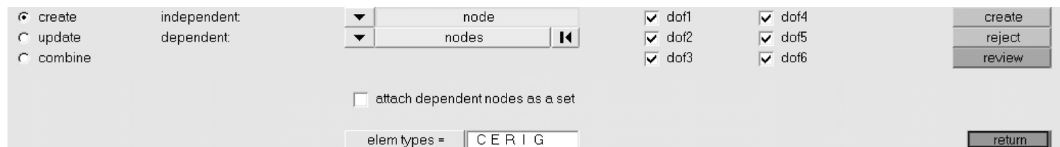


图 9-12　rigids 面板

7）利用 Tool 页面中的 edges 面板检查支腿和台面是否正确连接，必要时需要耦合节点。对于本例，梁单元与板壳单元的连接可采用节点耦合法。

图 9-13 所示为工作台—电动机的有限元网格模型（含边界条件）。

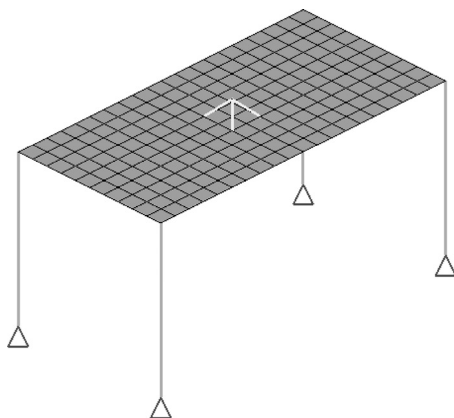


图 9-13　工作台—电动机的有限元网格模型（含边界条件）

STEP 2 单元定义

1）利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设置单元和单元选项。工作台台面选用 SHELL181 单元，并设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible），采用非协调模式的完全积分方法，以提高计算精度。

2）支腿选用 BEAM188 单元，并设置单元选项 K3=3（Cubic Form），即设置单元为三次形函数，以获取较高的计算精度。

3）电动机选用 MASS21 单元，无需设置单元选项。

4）刚性连接 CERIG 由 ANSYS 自动生成约束方程，无需定义单元类型、实常数和材料特性等属性。

STEP 3 设置实常数

利用 Utility 选项卡中的 Real Sets 按钮设置实常数。电动机质量为 100kg，应设置 MASS21 单元的实常数 MASSX（1）=100kg，MASSY（2）=100kg，MASSZ（3）=100kg，忽略转动惯量。

STEP 4 定义梁截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Leg，Section type 为 BEAM，Sub section type 为 RECT，勾选 Define by HyperBeam 复选框，并选择 New section 单选按钮，如图 9-14 所示。

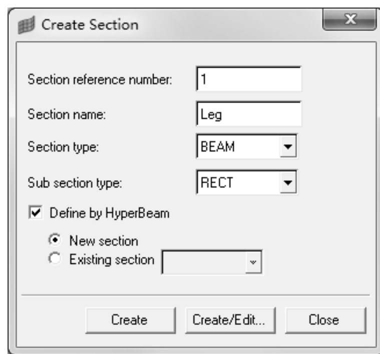


图 9-14　Create Section 对话框

3）单击 Creat/Edit 按钮，弹出 HyperBeam 数据浏览器。在左下方的 Parameters Definition 中，设置 Dimension(a)=0.02m，Dimension(b)=0.01m。

4）执行菜单命令 File→Exit，退出 HyperBeam 数据浏览器，返回 Create Section 对话框。

STEP 5 定义板壳截面

1）在 Create Section 对话框中，设置 Section name 为 Table，Section type 改为 SHELL。单击 Create/Edit 按钮，弹出板壳横截面设置卡片。设置 PLIES=1，表示单层板壳；设置 TK=0.02，定义板壳的厚度为 0.02m；设置 NUMPT(1)=3，定义沿板壳厚度方向的积分点个数为 3，这是 ANSYS 的默认值，如图 9-15 所示。最后，单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

2）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

3）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

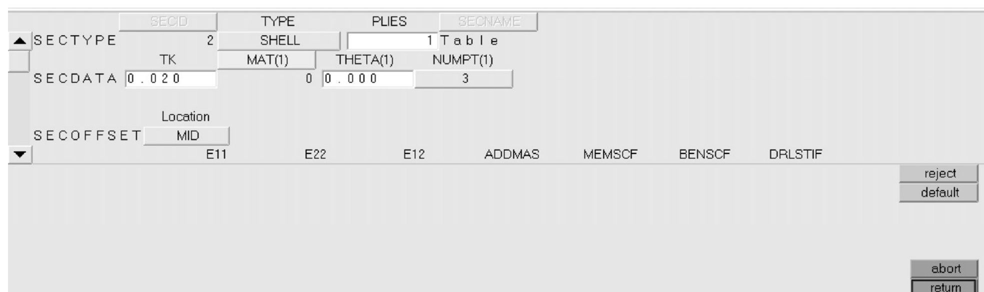
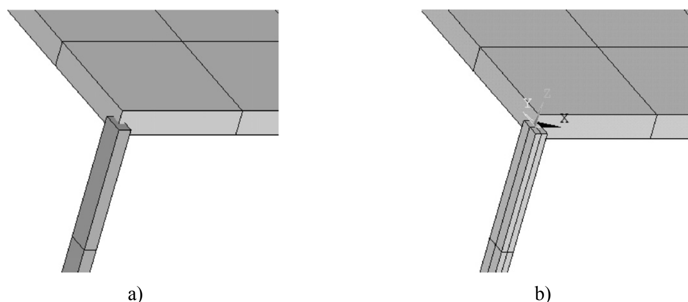


图 9-15　板壳横截面设置卡片

图9-16所示为位于原点附近的板壳和梁单元的三维实体显示，可见HyperMesh与ANSYS对于板壳和梁单元的截面显示是一致的。



a)　　b)

图 9-16　板壳和梁单元的三维实体显示

a) HyperMesh 显示　b) ANSYS 显示

STEP 6 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为台面和支腿定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E11Pa，泊松比 NUXY 为 0.3，密度 DENS 为 7850kg/m^3。

STEP 7 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Table 组件集、Leg 组件集和 Mass 组件集赋予相应的单元、实常数、横截面和材料。

STEP 8 边界条件定义

利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 9-13 所示的 4 个支腿底部节点的 6 个自由度，并将约束载荷放置于 constraints 载荷集。

STEP 9 模态分析求解控制

尽管基于完全法的谐响应分析无需进行模态分析，但峰值响应发生在激励的频率与结构的固有频率相等时。为了更方便地进行谐响应分析，应该首先进行模态分析，以确定结构的固有频率和振型。

在 Analysis 页面中，利用 control cards 面板设置控制卡片。

1）单击/SOLU 按钮，再单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

2）单击 ANTYPE 按钮，将 type 由 STATIC 切换为 MODAL，定义分析类型为模态分析，如图 9-17 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

3）单击 MODOPT 按钮，确认 method 为 LANB，将 nmode 设置为 6，其余选项保持默认设置，如图 9-18 所示。MODOPT 命令指定了模态的提取方法为 Block Lanczos，模态的提取阶数为 6。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

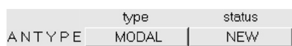


图 9-17　ANTYPE 命令



图 9-18　MODOPT 命令

4）单击 EQSLV 按钮，将 Lab 由 FRONT 切换为 SPARSE，指定方程求解器为稀疏矩阵求解器，如图 9-19 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 MXPAND 按钮，将 NMODE 设置为 6，将 Elcalc 切换为 YES，如图 9-20 所示。MXPAND 命令指定了模态的扩展阶数为 6，并开启计算单元结果选项。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 9-19　EQSLV 命令

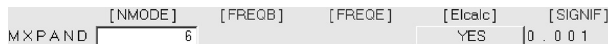


图 9-20　MXPAND 命令

6）单击 LUMPM 按钮，保持默认设置，采用一致质量矩阵，如图 9-21 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

7）单击 PSTRES 按钮，保持默认设置，不考虑预应力，如图 9-22 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 9-21　LUMPM 命令

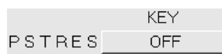


图 9-22　PSTRES 命令

8）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，再单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

当前的控制卡片如图 9-23 和图 9-24 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 9-23　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 9-24　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 8 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,MODAL,NEW
MODOPT,LANB,6,0,0,,OFF
EQSLV,SPARSE
MXPAND,6,,,YES,0.001
LUMPM,OFF
PSTRES,OFF
SOLVE
```

STEP 10 求解并查看模态分析结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Table_electromotor_modal.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Table_electromotor_modal.cdb 文件，并自动进行模态分析。表 9-1 为工作台-电动机的前 6 阶模态频率，图 9-25~图 9-30 为工作台-电动机的前 6 阶模态振型。

表 9-1　工作台-电动机的前 6 阶模态频率

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
频率/Hz	1.0036	1.9763	3.6350	9.7933	32.953	40.239

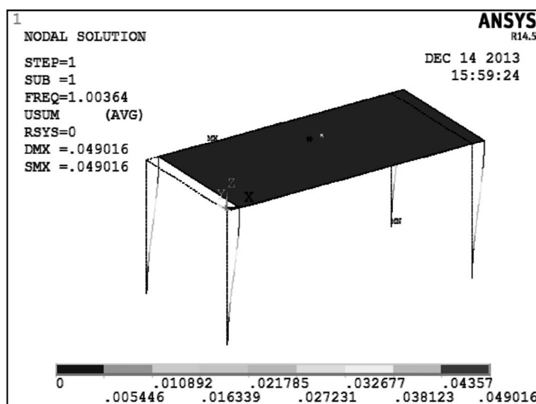


图 9-25　第 1 阶模态振型

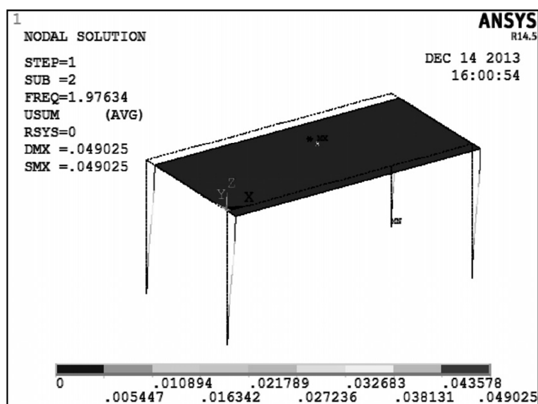


图 9-26　第 2 阶模态振型

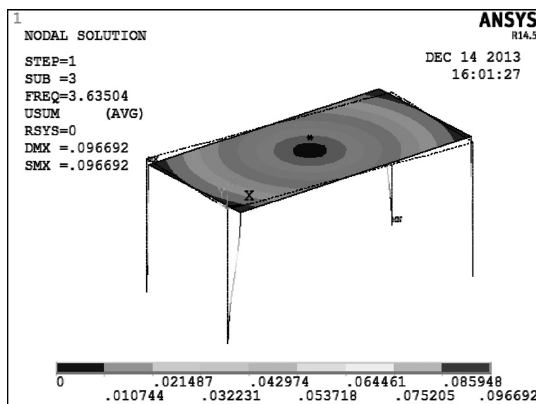


图 9-27　第 3 阶模态振型

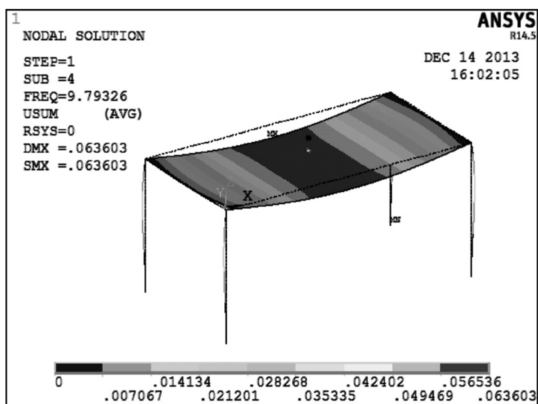


图 9-28　第 4 阶模态振型

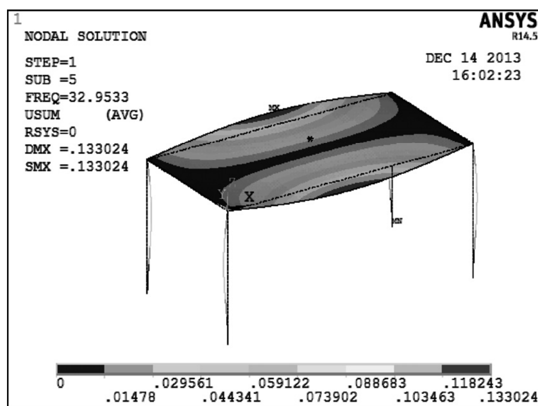


图 9-29　第 5 阶模态振型

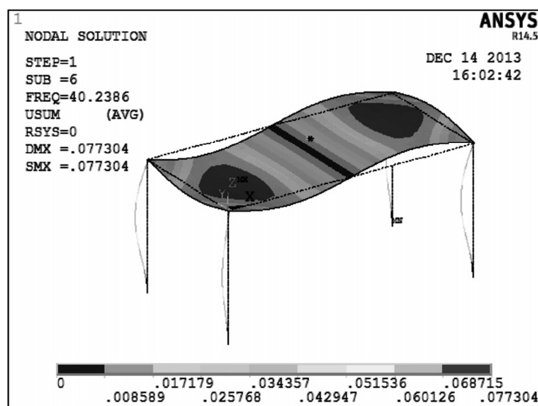


图 9-30　第 6 阶模态振型

STEP 11 谐响应分析求解控制

在 Analysis 页面中，利用 control cards 面板设置控制卡片。

1）删除第 9 步用于模态分析的 MODOPT 和 MXPAND 卡片，保留/SOLU、EQSLV、PSTRES、LUMPM、SOLVE 卡片。

2）单击 ANTYPE 按钮，将 type 由 MODAL 切换为 HARMIC，定义分析类型为谐响应分析，如图 9-31 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

3）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 HROPT 按钮，将 Method 设置为 FULL，其余选项保持为默认设置，如图 9-32 所示。HROPT 命令指定了谐响应分析的求解方法为完全法。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

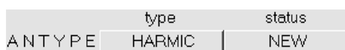


图 9-31　ANTYPE 命令



图 9-32　HROPT 命令

4）单击 HROUT 按钮，保持默认设置，结果输出采用实部+虚部的方式，如图 9-33 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 HARFRQ 按钮，将 FREQB 设置为 0，将 FREQE 设置为 10，如图 9-34 所示。HARFRQ 命令指定了强制激振频率范围为 0~10Hz。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

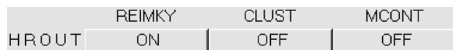


图 9-33　HROUT 命令

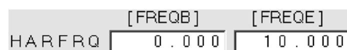


图 9-34　HARFRQ 命令

6）在 control cards 面板中，单击 prev 按钮，切换到上一个页面。单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 20，其余选项保持默认设置，如图 9-35 所示。NSUBST 命令指定了子步数为 20，即需要求解 0.5Hz，1Hz，1.5Hz，…，10Hz 的结果。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

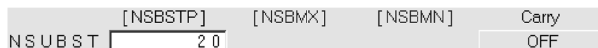


图 9-35　LUMPM 命令

7）单击 KBC 按钮，将 Key 由 0 切换为 1，如图 9-36 所示。KBC 命令指定了载荷的加载方式为阶跃，在强制频率范围内，载荷的幅值保持为恒定值。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

8）单击 DMPRAT 按钮，将 RATIO 设置为 0.02，如图 9-37 所示。DMPRAT 命令设置了结构的恒定阻尼比为 0.02，即 2%。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 9-36　PSTRES 命令



图 9-37　DMPRAT 命令

当前的控制卡片如图 9-38 和图 9-39 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 9-38　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 9-39　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 12 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,HARMIC,NEW
HROPT,FULL
HROUT,ON
EQSLV,SPARSE
LUMPM,OFF
PSTRES,OFF
HARFRQ,0,10
NSUBST,20
KBC,1
DMPRAT,0.02
SOLVE
```

STEP 12 载荷定义

利用 Analysis 页面中的 forces 面板，在质量单元施加载荷 F_x=100N，并放置于 force1 载荷集；在质量单元施加载荷 F_z=100N，并放置于 force2 载荷集。

注意：简谐载荷 F_x 和 F_z 的相位不同，必须分别指定载荷的实部和虚部分量。HyperMesh 只能施加载荷的实部，所以需要手工编辑 HyperMesh 输出的.CDB 文件，以满足 ANSYS 的要求，详见第 13 步。

STEP 13 修改.CDB 文件

1）利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Table_electromotor_harmonic.cdb 文件，并用文本编辑器（如记事本）打开。HyperMesh 12.0 按如下格式写出.CDB 文件。

```
/PREP7
ANTYPE,        3,     NEW
…
HARFRQ,0.0,10.0
HROPT,    FULL,       0,        0,         ,
HROUT,ON,OFF,OFF
…
LSCLEAR, ALL
…
F,1,FX,              100.0
…
F,1,FZ,              100.0
LSWRITE,1
…
NSUBST,       20,          ,          ,       OFF
KBC,          1
/SOLU
EQSLV,    SPARSE,          ,
PSTRES,OFF
LUMPM,OFF
DMPRAT,      0.02
SOLVE
```

2）由于 LSCLEAR,ALL 命令将清除之前的命令 HARFRQ,0.0,10.0，应将 LSCLEAR,ALL 命令删除，或在该命令前插入注释符!。

3）找到命令行 F,1,FZ,100.0，将其修改为 F,1,FZ,0,100.0，表示将载荷 F_z 修改为实部为 0，虚部为 100N，以满足 F_z 落后 F_x90° 相位角的要求，之后保存文件。

STEP 14 求解并查看谐响应分析结果

将修改后的 Table_electromotor_harmonic.cdb 文件输入到 ANSYS 中，ANSYS 将自动进行谐响应分析。

1）进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义并绘制工作台台面中点的位移-频率曲线，以确定临界频率，即振幅最大时对应的频率，如图 9-40 所示。

由图 9-40 可知，工作台台面在 1Hz 频率处产生了 X 方向的谐振（幅值为 0.148 565m）。对比模态分析（图 9-25）可知，简谐激励力 F_x 激发了工作台的第 1 阶模态振动（1.003 6Hz）。

同样的，工作台台面在 10Hz 频率附近产生了 Z 方向的谐振，但幅值非常小。对比模态分析（图 9-28）可知，简谐激励力 F_z 激发了工作台的第 4 阶模态振动，由于模态频率较高（9.793 3Hz），所以振幅很小。此外，F_x 和 F_z 无法激发工作台的其余阶模态，这可以从模态振型（图 9-26、图 9-27、图 9-29 和图 9-30）得到解释。事实上，0~10Hz 的强制激励频率范围包含了结构的前 4 阶模态频率，但只激发了结构的第 1 阶和第 4 阶模态振动。

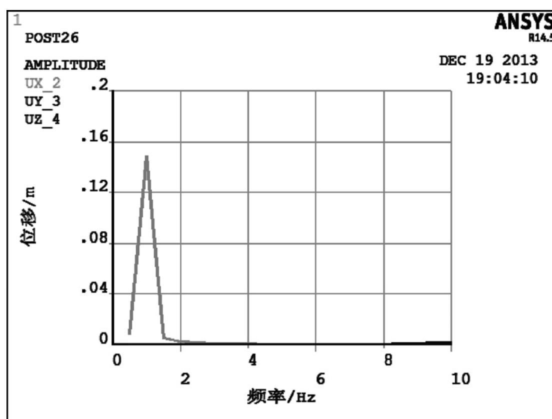


图 9-40　工作台台面中点的位移-频率曲线

2）进入通用后处理器 POST1，列出结果汇总表，如图 9-41 所示。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.50000	1	1	1
2	0.50000	1	1	1
3	1.0000	1	2	2
4	1.0000	1	2	2
5	1.5000	1	3	3
6	1.5000	1	3	3
7	2.0000	1	4	4
8	2.0000	1	4	4
9	2.5000	1	5	5
10	2.5000	1	5	5
11	3.0000	1	6	6
12	3.0000	1	6	6
13	3.5000	1	7	7
14	3.5000	1	7	7
15	4.0000	1	8	8

图 9-41　结果汇总表

由汇总表可知，LOADSTEP1、SUBSTEP2 为 1Hz 的结果，又分为 SET3 和 SET4，分别代表实部和虚部结果，如图 9-42 和图 9-43 所示。

3）使用命令 HRCPLX, 1, 2, 360 读入结构响应幅值（实部与虚部的矢量和），如图 9-44 所示。

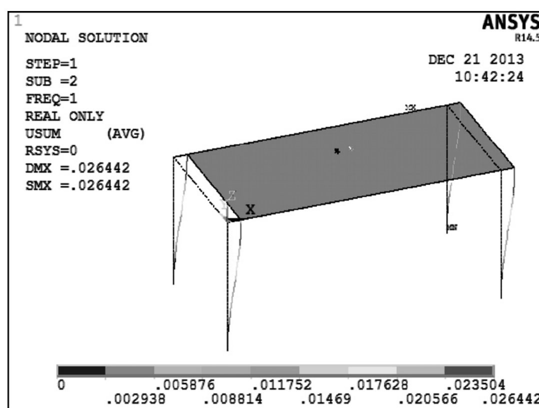


图 9-42 激励力频率为 1Hz 时的位移响应（实部）

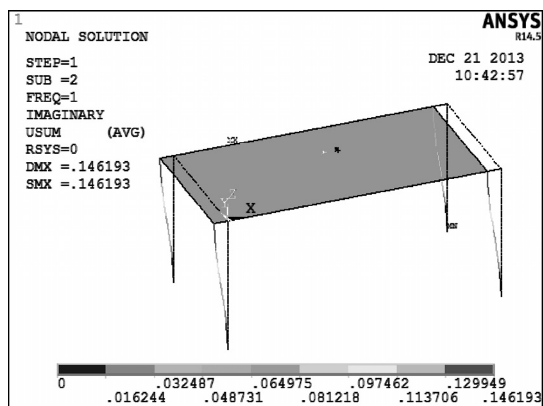


图 9-43 激励力频率为 1Hz 时的位移响应（虚部）

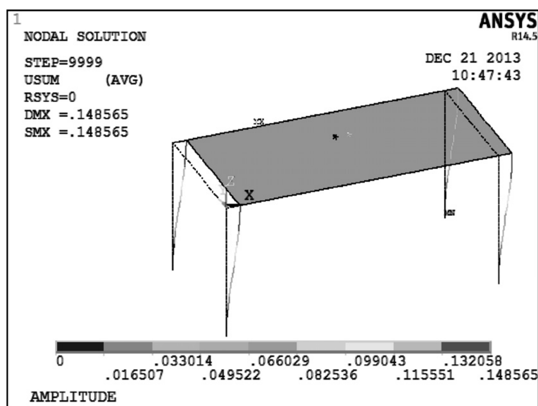


图 9-44 激励力频率为 1Hz 时的位移响应（幅值）

由图 9-42~图 9-44 可知，工作台台面中点产生了 *X* 方向的平移，幅值（0.148 565m）正好是实部极值（0.026 442m）和虚部极值（0.146 193m）的矢量和，也等于图 9-40 中的极值（0.148 565m）。这说明 POST26 可得到模型中指定点处的真实结果。

9.5 有预应力的谐响应分析实例

本实例在第 8.5 节的基础上，对钢丝（琴弦）进行有预应力的谐响应分析。横截面形状为圆形（直径 d=0.25mm）的钢丝，在 F_1=30N 的拉力作用下绷紧于两个刚性铰支点间，在距钢丝左端点 175mm 处作用一简谐力 F_2，幅值为 1N，频率范围为 0~1200Hz，如图 9-45 所示。求钢丝在 *X*-*Y* 平面内的谐响应。

1）钢丝的材料特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

2）假定结构的恒定阻尼比为 0.02。

3）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

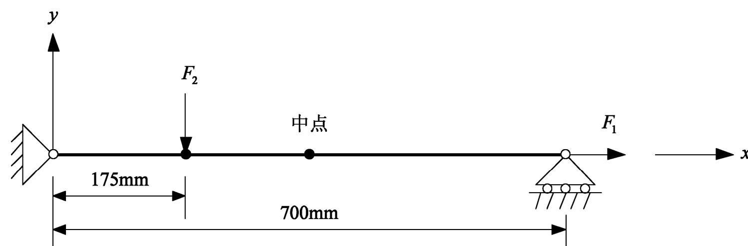


图 9-45 有预应力的钢丝

STEP① 建立有限元模型并完成静力分析和模态分析

第 8.5 节建立了钢丝的有限元模型，并完成了钢丝的预应力模态分析，在此基础上继续进行有预应力的谐响应分析。

STEP② 谐响应分析求解控制

1）完成有预应力的模态分析之后，退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）定义新的分析类型为谐响应分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis。如图 9-46 所示为 New Analysis 对话框。

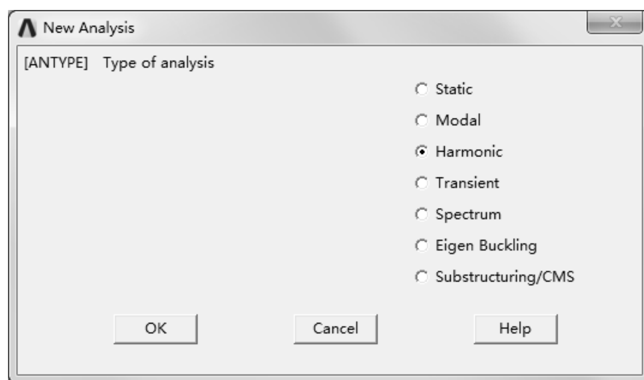


图 9-46 定义新的分析类型为 Harmonic

3）设置谐响应分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，保持默认选项，采用完全法。如图 9-47 所示为 Harmonic Analysis 对话框。

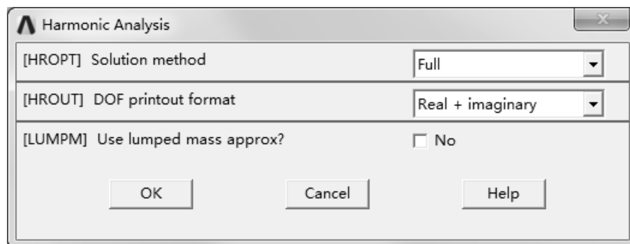


图 9-47 Harmonic Analysis 对话框

4）单击图 9-47 中的 OK 按钮，弹出 Full Harmonic Analysis 对话框，为包含静力分析中的预应力，将包含预应力效应的选项打开（勾选 Incl prestress effects）复选框，如图 9-48 所示。

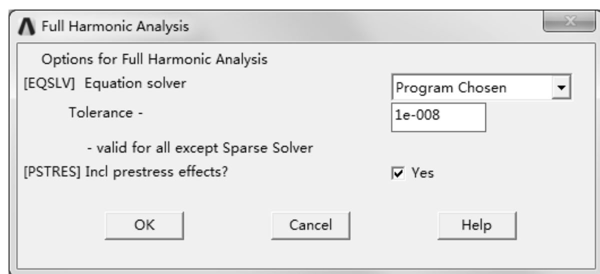


图 9-48　Full Harmonic Analysis 对话框

5）基于模态分析结果，设置载荷步选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load StepOpts→Time/Frequenc→Freq and Substps。指定强制激振频率范围为 0~1200Hz，正好包含结构的前 6 阶模态频率，子步数为 240，载荷加载方式为阶跃，表示在强制频率范围内载荷的幅值保持为恒定值，如图 9-49 所示。

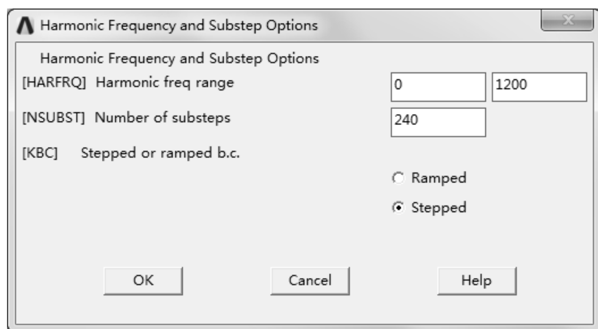


图 9-49　Harmonic Frequency and Substep Options 对话框

6）对于谐响应分析，应指定某种形式的阻尼，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load StepOpts→Time/Frequenc→Damping，本例设置结构的恒定阻尼比 DMPRAT=0.02，即 2%，如图 9-50 所示。

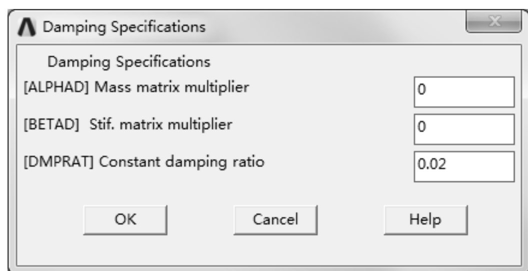


图 9-50　Damping Specifications 对话框

STEP 3 载荷定义

在预应力模态分析的基础上，只需施加简谐载荷 F_2，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Monent→On Nodes，选择图 9-45 的载荷作用点，设置力的方向为 FY，实部为 1N，如图 9-51 所示。

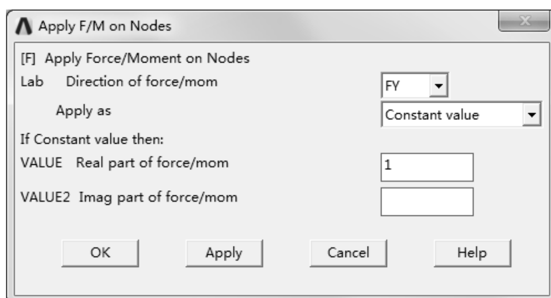


图 9-51 施加简谐力

STEP 4 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu > Solution > Solve > Current LS

进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义并绘制钢丝中点的位移-频率曲线，以确定临界频率，即振幅最大时对应的频率，如图 9-52 所示。

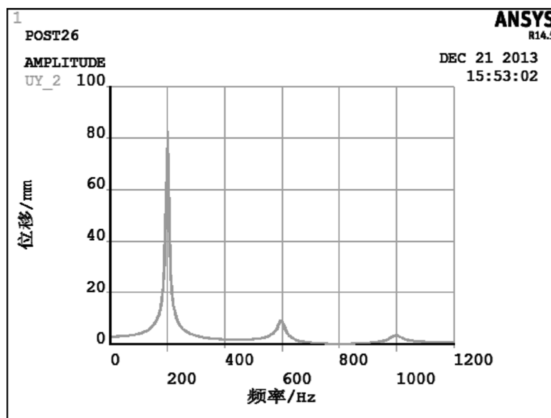


图 9-52 钢丝中点的位移-频率曲线（Y 方向）

由图 9-52 可知，钢丝中点在 200Hz、595Hz、1000Hz 频率处产生了 Y 方向的谐振，幅值分别为 82.650 2mm、9.127 38mm、3.340 04mm。对比模态振型（图 8-36~图 8-41）可知，简谐载荷 F_2 激发了钢丝的第 1 阶、第 3 阶、第 5 阶模态，钢丝中点在这几阶模态中产生了最大的振幅。特别地，频率越低，谐振越明显，表现为振幅越大。

9.6 本章小结

1）本章基于 ANSYS，介绍了谐响应分析的基本原理和分析步骤，有助于理解 HyperMesh 的建模过程。

2）本章的两个实例源于 ANSYS 教程。对于第一个实例（无预应力的谐响应分析），采用 HyperMesh 完成了除计算和后处理之外的所有步骤。但应注意的是，为正确执行谐响应分析，必须对 HyperMesh 输出的.CDB 文件进行修改。对于第二个实例（有预应力的谐响应分析），采用 HyperMesh 完成了静力分析设置，后续的模态分析和谐响应分析必须借助 ANSYS 界面才能完成。



3）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

4）尽管基于完全法的谐响应分析无需进行模态分析，但峰值响应发生在激励的频率与结构的固有频率相等时。为了更方便地进行谐响应分析，建议先进行模态分析，以确定结构的固有频率和振型。

5）在谐响应分析中，应指定某种形式的阻尼，否则在共振频率处的响应将无限大。

6）对于有预应力的谐响应分析，在静力分析、模态分析和谐响应分析中都需要开启预应力效应。

7）谐响应分析只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑发生在激励开始时的瞬态振动。为克服谐响应分析的局限性，应进行瞬态动力学分析，详见第 10 章。

第 10 章　瞬态动力学分析

瞬态动力学分析也称为时间历程分析，是用于确定承受任意随时间变化载荷结构动力学响应的一种技术。用户可以使用瞬态动力学分析确定结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的任意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力和力。载荷和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较重要。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力分析代替瞬态动力学分析。

瞬态动力学分析可包含所有类型的非线性，如大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触（间隙）单元和超弹性单元等。相对于其他分析技术（如静力分析、模态分析、谐响应分析和响应谱分析等），瞬态动力学分析更接近工程实际，因此得到广泛应用。

本章主要介绍了线性瞬态动力学分析的基本原理、分析步骤和关键技术，给出了利用 HyperMesh 进行瞬态动力学分析和有预应力的瞬态动力学分析前处理的实例，并解释了瞬态动力学分析的结果。

10.1　瞬态动力学分析的求解方法

瞬态动力学的基本方程是

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{F\} \tag{10-1}$$

式中，$[M]$ 为结构质量矩阵；$[C]$ 为结构阻尼矩阵；$[K]$ 为结构刚度矩阵；$\{\ddot{U}\}$ 为节点加速度矢量；$\{\dot{U}\}$ 为节点速度矢量；$\{U\}$ 为节点位移矢量；$\{F\}$ 为力矢量。

ANSYS 提供了两种方法求解方程式（10-1），即中心差分法和 Newmark 法（包括改进的 HHT 方法）。中心差分法用于 ANSYS LS-DYNA 的显式瞬态动力学分析，读者可参阅 LS-DYNA 的相关书籍，而 Newmark 法用于 ANSYS 隐式瞬态动力学分析。

在任意给定的时间 t，式（10-1）可看做是一系列考虑了惯性力 $[M]\{\ddot{U}\}$ 和阻尼力 $[C]\{\dot{U}\}$ 的静力平衡方程。ANSYS 使用 Newmark 时间积分方法在离散的时间点上求解这些方程，两个连续时间点间的时间增量称为积分时间步长。

ANSYS 14.5 提供了两种 Newmark 时间积分方法，即完全法和模态叠加法，分别介绍如下。

（1）完全法

完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态动力学响应（没有矩阵缩减）。它是一种通用的方法，允许包括各类非线性特性（如塑性、大变形、大应变等）。完全法的优点是：

1）容易使用，因为不必关心如何选取振型。

2）允许各种类型的非线性特性。

3）采用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵近似。

4）一次分析就能得到所有的位移和应力。

5）允许施加所有类型的载荷，如节点力、外加的（非零）位移和单元载荷（压力和温度），还允许通过 TABLE 数组参数指定表边界条件。



6）允许在实体模型上施加载荷。

完全法的主要缺点是它比模态叠加法的开销大。

（2）模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（特征向量）乘以因子并求和来计算结构的响应，它的优点是：

1）对于许多问题，它比完全法更快、开销更小。

2）可通过 LVSCALE 命令将模态分析中施加的单元载荷引入到瞬态动力学分析中。

3）允许考虑模态阻尼（阻尼比为振型的函数）。

模态叠加法的缺点是：

1）在整个瞬态动力学分析过程中，时间步长必须保持恒定，不允许采用自动时间步长。

2）唯一允许的非线性是简单的点-点接触（间隙条件）。

3）不能施加强制位移（非零位移）。

尽管完全法需要消耗更多的计算资源，但其功能强大，且方便使用。本书主要介绍基于完全法的瞬态动力学分析。

10.2 瞬态动力学分析的基本步骤

STEP 1 建立有限元网格模型

根据实际问题的特点，对所分析的问题进行初步计划；建立反映真实物理情况的 CAD 模型或简化的 CAD 模型，并对其划分有限元网格；定义单元类型、单元选项、实常数、截面特性和材料特性。

在进行瞬态动力学分析时，要注意如下内容：

1）可以使用线性和非线性单元。

2）必须指定杨氏模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量）。

3）材料特性可以是线性的或非线性的、各向同性的或各向异性的、恒定的或与温度相关的。

对于网格密度，要注意如下内容：

1）网格密度应当密到足以确定感兴趣的最高阶振型。

2）对应力或应变感兴趣的区域，网格密度应比只考察位移的区域更密一些。

3）如果要包含非线性特性，网格密度应当密到足以捕捉到非线性效应。例如，塑性分析要求在较大塑性变形梯度的区域有合理的积分点密度，即要求较密的网格。

4）如果对波传播效应感兴趣，如一根杆的末端准确落地，则网格密度应当密到足以解算出波动效应。一个基本准则是沿波的传播方向的每一个波长至少划分 20 个单元。

STEP 2 设置求解控制选项

进行瞬态动力学分析时，首先应定义分析类型为瞬态动力学分析（ANTYPE,TRANS），再通过求解控制对话框来设置求解选项，如图 10-1 和图 10-2 所示。

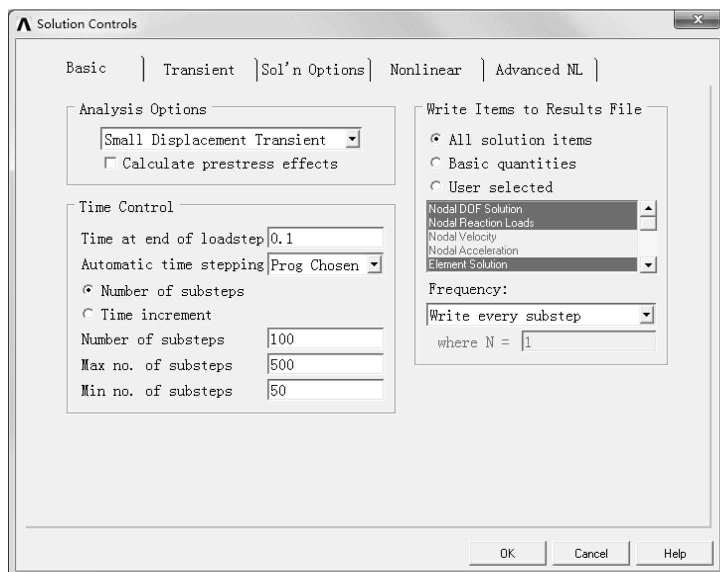


图 10-1　Solution Controls 对话框-Basic 选项卡

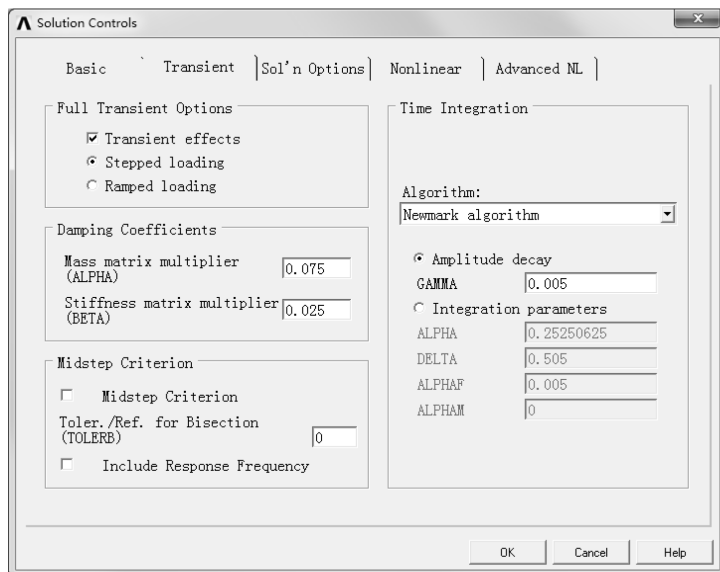


图 10-2　Solution Controls 对话框-Transient 选项卡

Basic 选项卡用于设置分析选项、时间控制和结果文件控制。图 10-1 中定义了小变形的瞬态动力学分析，求解时间为 0.1，开启自动时间步长控制，初始载荷子步为 100，最大载荷子步为 500，最小载荷子步为 50，将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步。

Transient 选项卡主要用于设置瞬态动力选项。图 10-2 中开启了时间积分效应，采用阶跃载荷加载，阻尼系数 ALPHA=0.075，BETA=0.025。

一般地，对于线性瞬态动力学分析，仅须设置 Basic 选项卡和 Transient 选项卡。

STEP 3 施加边界条件及载荷

ANSYS 通常的约束、力/力矩、面载荷、体载荷和惯性载荷在瞬态动力学分析中都能运用，所有载荷都是时间的函数。除惯性载荷、速度载荷和加速度载荷外，其余载荷可以施加到实体模型或有限元模型上。

值得注意的是，位移载荷容易导致加速度的不连续，继而产生数字噪声，可以将作用于基础的位移载荷转化为作用于整体结构的加速度载荷，而保持基础为固定约束。结构动力学理论表明，由于基础加速度引起的结构变形与对整体结构施加相应加速度的作用效果完全相同[17]。

STEP 4 建立初始条件

由于要求解的方程式（10-1）是二阶的，瞬态动力学分析要求给定两种初始条件：初始位移 u_0 和初始速度 $\dot{u}_0$，详见第 10.4.3 节。

STEP 5 求解

在执行求解命令之前，可将当前模型进行备份，以便将来恢复模型。

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS / From LS Files（后者用于求解多载荷步）

STEP 6 查看结果

瞬态动力学分析结果数据与静力分析基本相同，不同的是，所有数据都是时间的函数，且包含速度和加速度解。

可以用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 进行后处理，查看结果。POST1 用于对整个模型在某一时刻的结果进行检查；POST26 用于跟踪整个载荷作用时间历程上的特定结果。

10.3 有预应力的瞬态动力学分析

不同于有预应力的模态分析和谐响应分析，有预应力的瞬态动力学分析采用多载荷步完成。第一个载荷步采用准静态分析，用于施加预应力，后续载荷步进行瞬态动力学分析。需要注意的是，预应力载荷在后续载荷步中均保持恒定，且整个分析过程不需要开启预应力效应。

有预应力的瞬态动力学分析过程如下。

（1）第一个载荷步

1）设定分析类型为瞬态分析（ANTYPE,TRANS），但关闭瞬态效应（TIMINT,OFF）。

2）施加预应力载荷。

3）若存在应力刚化，则必须开启应力刚化效应（SSTIF,ON），或者开启大变形效应（NLGEOM,ON，目的也在于开启应力刚化效应），进行非线性分析。

4）设置很小的求解时间。

5）写出第一载荷步 jobname.s01。

（2）后续载荷步

在后续载荷步中，开启时间积分效应（TIMINT,ON），不必更改应力刚化设置，按常规方法进行瞬态动力学分析。应特别注意的是，在后续所有载荷步中必须保留初始的预应力载荷不变。用 LSWRITE 命令将所有的载荷步保存到文件中，最后用 LSSOLVE 命令进行多载荷步求解。

10.4 瞬态动力学分析的关键技术

10.4.1 积分时间步长

瞬态分析求解的精度取决于积分时间步长的大小。时间步长越小，精度越高。但太小的时间步长将浪费计算资源，太大的积分时间步长将引发高阶模态响应的误差，从而影响整体响应。要想计算出最优时间步长，应当遵循下列 6 个准则。

1）求解响应频率时，时间步长应当足够小，以能求解出结构的运动（响应）。

由于结构的动力学响应可以看做各阶模态响应的组合，时间步长应小到能够解出对整体响应有贡献的最高阶模态。对于 Newmark 时间积分方案，已经发现当时间步长按 20 倍最高频率取值时会产生精度级比较合理的解。也就是说，如果 f 表示频率（单位为 Hz），积分时间步长 Δt 应为

$$\Delta t = \frac{1}{20f} \tag{10-2}$$

如果要得到加速度结果，可能要求更小的 Δt 值。图 10-3 表示了 Δt 值对单自由度弹簧-质量系统周期延长量的影响。可以看到，当取每周 20 或更多个时间点时，引起的周期延长将小于 1%。

2）求解所加载荷-时间关系曲线时，时间步长应当小到足以“跟随”载荷函数。

响应总是倾向滞后于所施加的载荷，特别是对于阶跃载荷，如图 10-4 所示。在发生阶跃的时间点附近，要求采用较小的 Δt，也许要小到和 $1/(180f)$ 接近，以紧紧跟随载荷的阶跃变化。

3）在涉及接触（碰撞）的问题中，时间步长应当小到足以捕捉到两个接触表面之间的动量传递，否则将发生明显的能量损失，从而碰撞将不会是完全弹性的。积分时间步长可由接触频率 f_c 确定

$$\Delta t = \frac{1}{nf_c} \tag{10-3}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{10-4}$$

式中，k 为间隙刚度；m 为作用在间隙上的有效质量；n 为每周的点数。

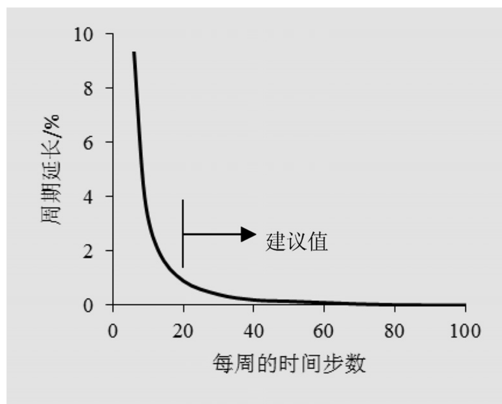


图 10-3 积分时间步长对周期延长的影响

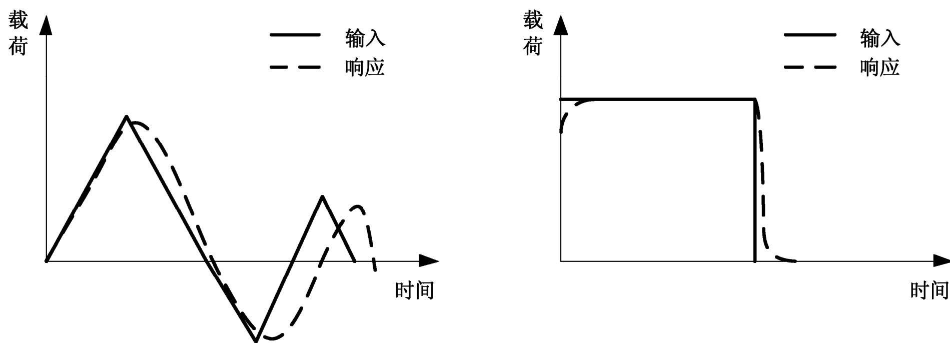


图 10-4 瞬态输入/瞬态响应曲线

要使能量损失最小，每周至少要取 30 个点（n=30）。如果要得到加速度结果，可能要取更大的 n 值。对于模态叠加法，应保证 n 不小于 7，以确保求解的稳定性。如果接触时间和接触质量比整个瞬态过程的时间和系统质量小得多，则可以在每周取少于 30 个点（n<30），这是因为此时的能量损失对总体响应的影响很小。

4）如果对波传播效应感兴趣，则时间步长应当小到当波在单元之间传播时足以捕捉到波动效应。

5）求解非线性效应问题时，对于大部分问题，满足前面几个准则的时间步长就可捕捉到非线性行为。但也有少数例外的情形，例如，从弯曲状态变化到薄膜承载状态的大变形问题，结构在载荷作用下趋于刚化，这时必须求解被激活的高阶模态，使用更小的时间步长。

6）满足时间步长的精度准则。在每一个时间步长的末端满足动力学方程，以确保在离散时间点的平衡。在中间时刻的平衡通常是不满足的。如果时间步长足够小，则结构的中间状态不会偏离平衡状态很多。反之，如果时间步长取得太大，结构的中间状态会较大的偏离平衡状态。

用合适的准则计算出时间步长后，在具体分析中应该用最小的步长值。可以采用自动时间步长来让 ANSYS 决定在求解中何时增大或减小时间步长，自动时间步长将在第 10.4.2 节进行讨论。

注意：应避免使用极小的时间步长，特别是建立初始条件时，因为过小的数值可能引起数值计算困难。例如，基于计算时间大小而言，小于 10^{-10} 数量级的时间步长就会引起数值计算困难。

10.4.2 自动时间步长

自动时间步长也称作时间步长优化，它试图按响应频率和非线性效果来调整求解期间的积分时间步长。此特征的主要好处是可以减少子步的总数，从而节省计算机资源。同理，采用自动时间步长可以大大减少可能需要进行重新分析的次数。如果存在非线性，自动时间步长还会带来另外一个好处：适当地增加载荷并在达不到收敛时回溯到先前收敛的解（二分法）。可以用 AUTOTS,ON 命令激活自动时间步长。

虽然对于所有分析都激活自动时间步长似乎是一个好主意，但在有些情况下，自动时间步长可能是无益的，甚至可能是有害的：

1）只在结构的局部有动力学行为的问题（如涡轮叶片和轮毂组件等），这时系统部件的低频能量部分远远高于高频部分。

2）受恒定激励的问题（如地震载荷等），在这种情形下，当不同频率被激活时时间步长趋于连续变化。

3）运动学问题（刚体运动），在这种情形下，刚体运动对响应频率项的贡献将占主导地位。

10.4.3 初始条件

在进行完全法瞬态动力学分析之前，读者需要正确理解建立初始条件和正确使用载荷步。

顾名思义，瞬态动力学分析中的载荷是时间的函数。为了定义这样的载荷，用户需要将载荷-时间关系曲线划分成合适的载荷步。载荷-时间关系曲线上的每个“拐角”对应一个载荷步，如图 10-5 所示。

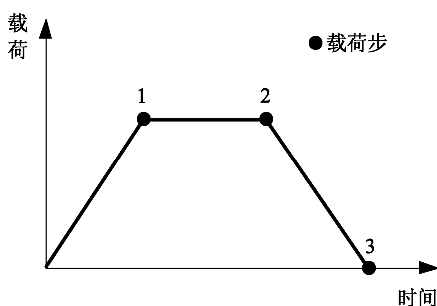


图 10-5 载荷-时间关系曲线

第一个载荷步通常用来建立初始条件，为第二个和后继瞬态载荷步施加载荷并设置载荷步选项。对于每个载荷步，都要指定载荷值和时间值，同时指定其他的载荷步选项，如采用阶跃加载还是斜坡加载方式施加载荷，以及是否使用自动时间步长等。然后，将每个载荷步写入载荷步文件，最后一次性求解所有载荷步。

施加瞬态载荷的第一步是建立初始条件，即零时刻时的情况。由于要求解的方程式（10-1）是二阶的，瞬态动力学分析要求给定两种初始条件：初始位移 u_0 和初始速度 $\dot{u}_0$。如果没有进

行特意设置，u_0 和 $\dot{u}_0$ 都被假定为 0。初始加速度 $\ddot{u}_0$ 通常假定为零，但可以通过在一个小的时间间隔内施加合适的加速度载荷来指定非零的初始加速度。

下面描述了如何施加不同组合形式的初始条件。

（1）零初始位移和零初始速度

这是默认的初始条件，如果 $u_0 = \dot{u}_0 = 0$，则不需要指定任何条件。在第一个载荷步中可以加上对应于载荷-时间关系曲线的第一个拐角处的载荷。

（2）零初始位移和非零初始速度

非零速度是通过对结构中须指定速度的部分加上小时间间隔上的小位移来实现的。例如，$\dot{u}_0$=0.25，可以通过在时间间隔 0.004 内加上 0.001 的位移来实现，命令流如下：

```
...
TIMINT,OFF              ! 关闭时间积分效应，采用静态计算
D,ALL,UY,0.001          ! 指定小位移（假定速度为 Y 方向）
TIME,0.004              ! 设定时间，初始速度=0.001/0.004=0.25
KBC,0                   ! 设定为斜坡加载，逐步加载强迫位移，保持恒定的初始速度
LSWRITE,1               ! 写出第一个载荷步，初始条件设置完成
DDEL,ALL,UY             ! 在后续瞬态分析中删除不必要的强制位移
TIMINT,ON               ! 开启时间积分效应，采用瞬态分析
...
```

（3）非零初始位移和非零初始速度

与（2）的情形相似，不过施加的位移是真实数值而非“小”数值。例如，u_0= 1.0，且 $\dot{u}_0$ = 2.5，则应当在时间间隔 0.4 内施加一个值为 1.0 的位移，命令流如下：

```
...
TIMINT,OFF              ! 关闭时间积分效应，采用静态计算
D,ALL,UY,1.0            ! 指定初始位移（假定速度为 Y 方向）
TIME,0.4                ! 设定时间，初始速度=1.0/0.4=2.5
KBC,0                   ! 设定为斜坡加载，逐步加载强迫位移，保持恒定的初始速度
LSWRITE,1               ! 写出第一个载荷步，初始条件设置完成
DDELE,ALL,UY            ! 在后续瞬态分析中删除不必要的强制位移
TIMINT,ON               ! 开启时间积分效应，采用瞬态分析
...
```

（4）非零初始位移和零初始速度

需要用两个子步（NSUBST,2）来实现，所加位移在两个子步间是阶跃变化的（KBC,1）。如果位移不是阶跃变化的或只用一个子步，所加位移将随时间变化，从而产生非零初始速度。下面的例子演示了如何施加初始条件 u_0=1.0，$\dot{u}_0$=0，命令流如下：

```
...
TIMINT,OFF              ! 关闭时间积分效应，采用静态计算
D,ALL,UY,1.0            ! 指定初始位移（假定为 Y 方向）
TIME,0.001              ! 设定小的时间
NSUBST,2                ! 设定两个子步
KBC,1                   ! 设定为阶跃加载，即位移载荷在第一个子步达到最大值（产生
                          非零速度），第二个子步不变化（速度置零）
```

```
LSWRITE,1              ！写出第一个载荷步，初始条件设置完成
TIMINT,ON              ！开启时间积分效应，采用瞬态分析
...
```

（5）非零初始加速度

可以近似地通过在小的时间间隔内指定要加的加速度实现。例如，施加初始加速度为 9.81 的命令如下：

```
...
TIMINT,ON        ！开启时间积分效应，采用瞬态分析
ACEL,,9.81       ！施加加速度（假定为 Y 方向）
TIME,0.001       ！设定小的时间
NSUBST,2         ！设定两个子步
KBC,1            ！设定为阶跃加载，加速度在第一个子步达到最大值的一半，第二个子步达
                   到最大值
DDELE, ...       ！删除施加加速度方向（Y 方向）的约束，否则初始加速度将不起作用
LSWRITE,1        ！写出第一个载荷步，初始条件设置完成
...
```

非零初始位移及/或非零初始速度也可以用 IC 命令进行设置，但应谨慎使用，以避免自相矛盾的初始条件，具体细节请参阅 ANSYS 命令参考手册。

10.4.4 阻尼

阻尼是用来度量系统自身消耗振动能量的能力的物理量。大多数系统中存在阻尼，因此，在动力学分析中应当指定阻尼。阻尼的本质和表现十分复杂，相应的模型也很多。ANSYS 14.5 可以指定 8 种形式的阻尼：

1）ALPHA 和 BETA 阻尼，也称为 Rayleigh 阻尼。

2）与材料相关的阻尼。

3）恒定的材料阻尼系数。

4）恒定的阻尼比。

5）模态阻尼或振型阻尼。

6）单元阻尼。

7）材料结构阻尼系数。

8）粘弹性材料阻尼。

可以在模型中指定多种形式的阻尼，ANSYS 按所指定的阻尼之和形成阻尼矩阵[C]。

在瞬态动力学分析中，常用 Rayleigh 阻尼，其阻尼矩阵[C]具有以下形式

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \tag{10-5}$$

式中，$[M]$为结构质量矩阵；$[K]$为结构刚度矩阵；α 为质量阻尼系数；β 为刚度阻尼系数。

ALPHAD 和 BETAD 命令分别用于设置 Rayleigh 阻尼系数 α 和 β。通常，α 和 β 的值不是直接得到的，而是用振型阻尼比 ξ_i 计算出来的。ξ_i 是某个振型 i 的实际阻尼与临界阻尼之比，简称阻尼比，通常用实验来测定[18]。如果 ω_i 是第 i 阶模态的固有角频率（单位为 rad/s），则 α 和 β 满足下列关系

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \tag{10-6}$$

为了确定对应给定阻尼比ξ的α和β值，通常假定α和β之和在某个频率范围内近似为恒定值，如图 10-6 所示。于是，在给定阻尼比ξ和一个频率范围$\omega_1 \sim \omega_2$之后，解两个并列方程便可求得α和β

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{10-7}$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \tag{10-8}$$

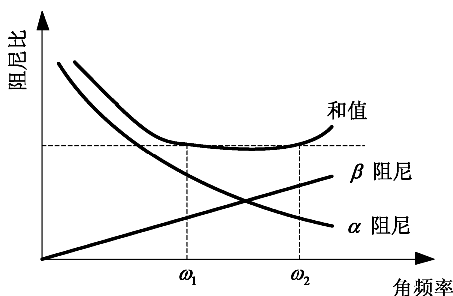


图 10-6　Rayleigh 阻尼

在许多实际问题中，α阻尼可以忽略，即α=0。在这种情形下，可以由已知的ξ_i和ω_i计算出β

$$\beta = \frac{2\xi_i}{\omega_i} \tag{10-9}$$

由于在一个载荷步中只能输入一个β值，因此应该选取该载荷步中最主要的被激活频率来计算β值。

10.5　瞬态动力学分析实例

如图 10-7 所示的工作台-电动机系统，当电动机工作时，由于转子偏心引起电动机发生简谐振动，这时电动机的旋转偏心载荷是一个简谐激励，计算结构在该激励下的瞬态响应。已知条件如下。

1）工作台面板：长=2m（*X* 方向），宽=1m（*Y* 方向），厚=0.02m（*Z* 方向）。

2）工作台 4 条腿的梁几何特性：长=1m（*Z* 方向），截面宽度=0.01m（*X* 方向），截面高度=0.02m（*Y* 方向）。

3）电动机质量 m=100kg，质心位于工作台正上方 0.1m。

4）简谐激励 F_x、F_z 的幅值为 100 N，F_z 落后 F_x 90° 的相位角。

5）电动机转动频率为 1Hz。

6）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 2.1×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

7）假定结构的恒定阻尼比为 0.02。

8）本例采用国际单位制。

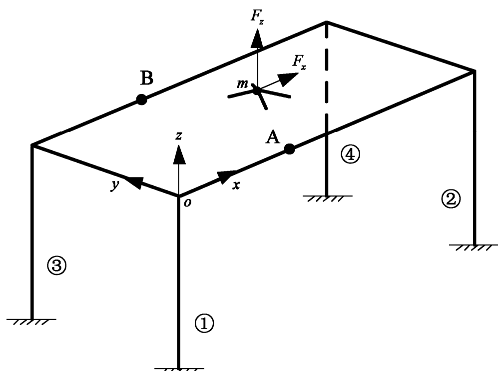


图 10-7　工作台-电动机示意图

STEP 1 建立有限元模型并完成模态分析

第 9.4 节建立了工作台-电动机的有限元模型，并完成了模态分析，在此基础上继续进行瞬态动力学分析。

STEP 2 瞬态动力学分析求解控制

尽管 HyperMesh 为 ANSYS 提供了部分用于瞬态动力学分析的控制卡片，但它并不能为 ANSYS 施加函数载荷和表格载荷，也不便于为瞬态动力学分析设置合适的载荷步。以下借助 ANSYS 界面完成瞬态动力学分析。

1）完成模态分析之后，退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）定义新的分析类型为瞬态动力学分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type →New Analysis。如图 10-8 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分析类型为 Transient。

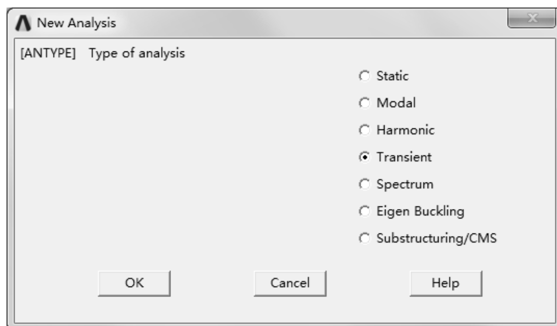


图 10-8　定义新的分析类型为 Transient

3）单击图 10-8 中的 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，保持默认设置，即完全法，单击 OK 按钮，如图 10-9 所示。

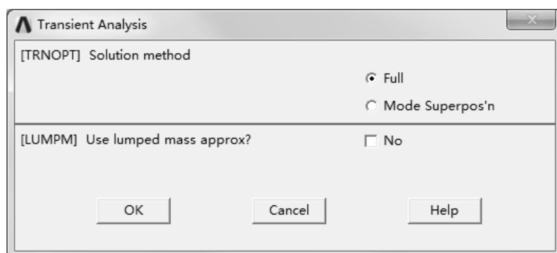


图 10-9　Transient Analysis 对话框

4）基于模态分析结果，设置瞬态动力学分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution →Analysis Type →Sol’n Controls，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中设置求解结束时间为 40s，关闭自动时间步长控制，设置积分时间步长为 0.05s，将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步，如图 10-10 所示。在 Transient 选项卡中开启时间积分效应，采用斜坡载荷加载，设置阻尼系数 ALPHA=0.2285，BETA=5.787E-4，如图 10-11 所示。

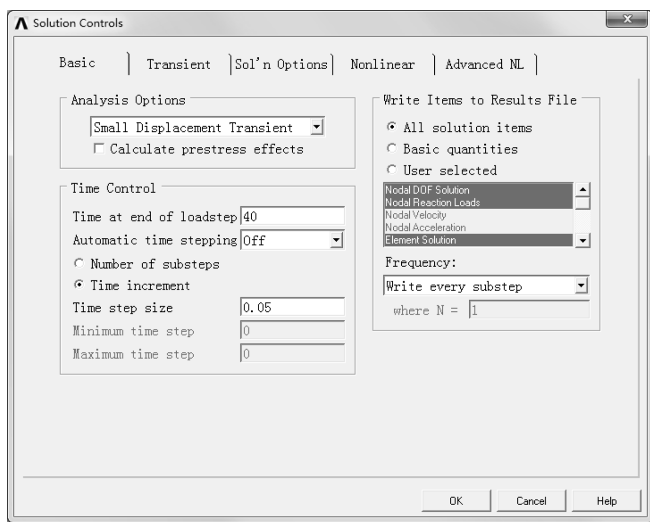


图 10-10　Solution Controls 对话框-Basic 选项卡

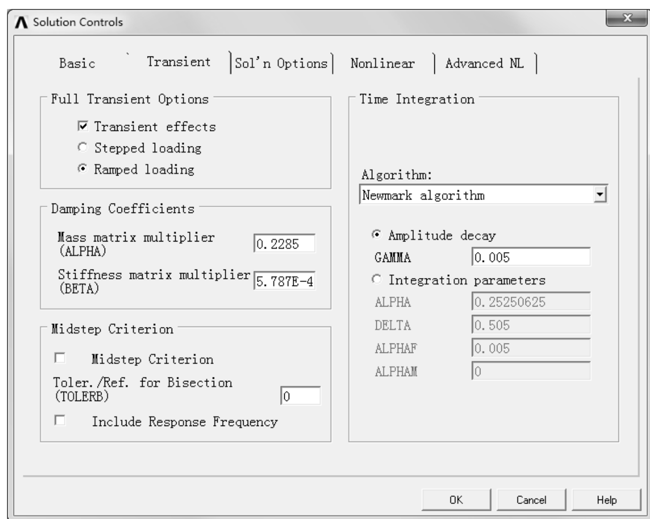


图 10-11　Solution Controls 对话框-Transient 选项卡

说明：① 设置 40s 的求解结束时间是为了使结构响应趋于稳定。

② 积分时间步长由式（10-2）计算。工作台-电动机系统的第 1 阶模态（频率约为 1Hz）对结构振动贡献最大，故取频率 f=1Hz，求得积分时间步长 Δt =0.05s。

③ 阻尼系数 ALPHA（α）和 BETA（β）分别由式（10-7）和式（10-8）计算。结构的恒定阻尼比 ξ =0.02。假设 ALPHA 和 BETA 之和在 1～10Hz 频率范围内（覆盖前 4 阶模态）

近似为恒定值，则 $\omega_1 = 2\pi$，$\omega_2 = 20\pi$，代入式（10-7）和式（10-8），可求得 ALPHA=0.2285，BETA=5.787E-4。

STEP 3 定义载荷函数

与时间相关的载荷可以通过函数或表格来定义，本例采用函数方式定义载荷，采用表格方式定义载荷的实例详见第 16.3 节。

1）为 F_x 定义函数 FUNC1。GUI 方式为 Parameters→Functions→Define/Edit，在函数编辑器中设置 Result=100*sin（2*{PI}*{TIME}），如图 10-12 所示。利用 GRAPH 按钮，可绘制当前定义的函数图像，如图 10-13 所示。可知，函数幅值为 100，频率为 1Hz。

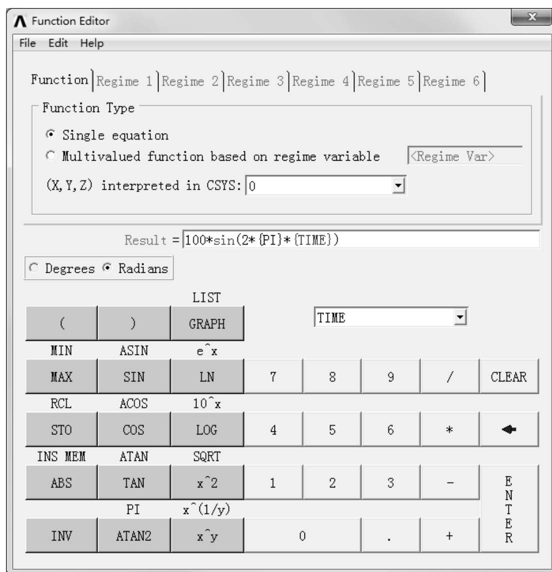


图 10-12 Function Editor 对话框

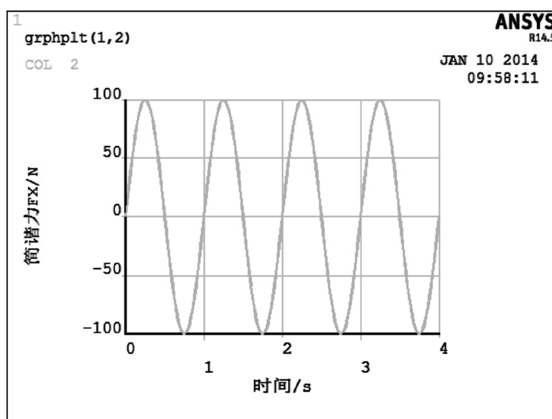


图 10-13 简谐力 F_x 的函数图像

2）将定义的函数保存为函数文件 FUNC1.func。

3）为 F_z 定义函数 FUNC2。F_z 落后 F_x 90° 的相位角，故 FUNC2 为分段函数。对于 Function 选项卡，应选择 Multivalued function based on regime variable 单选按钮，设置<Regime Var>={TIME}，以时间作为横坐标，如图 10-14 所示。对于 Regime 1 选项卡，设置<Regime Var>

的区间为 0～0.25s，Result=0*{TIME}，如图 10-15 所示。对于 Regime 2 选项卡，设置<Regime Var>的区间为 0.25～40s，Result=100*sin（2*{PI}*{TIME}-0.5*{PI}），如图 10-16 所示。利用 GRAPH 按钮，可绘制当前定义的函数图像，如图 10-17 所示，可知，函数幅值为 100，频率为 1Hz，且相位落后 F_x 90°。

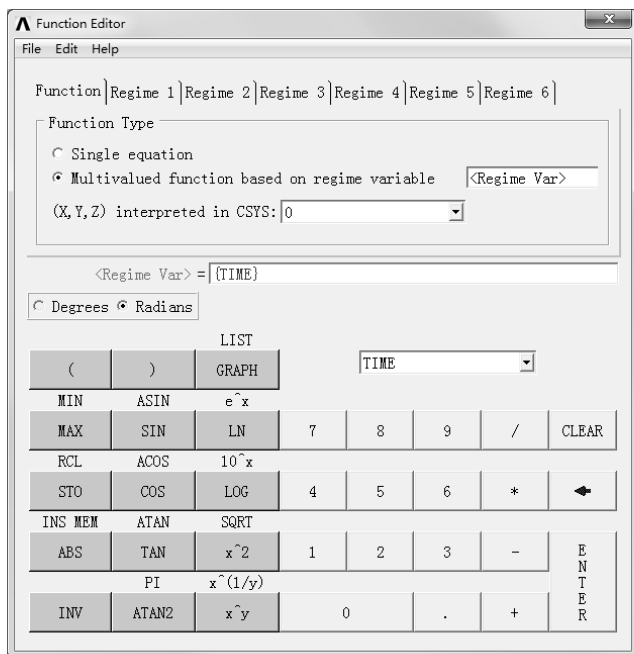


图 10-14 Function Editor 对话框-Function 选项卡

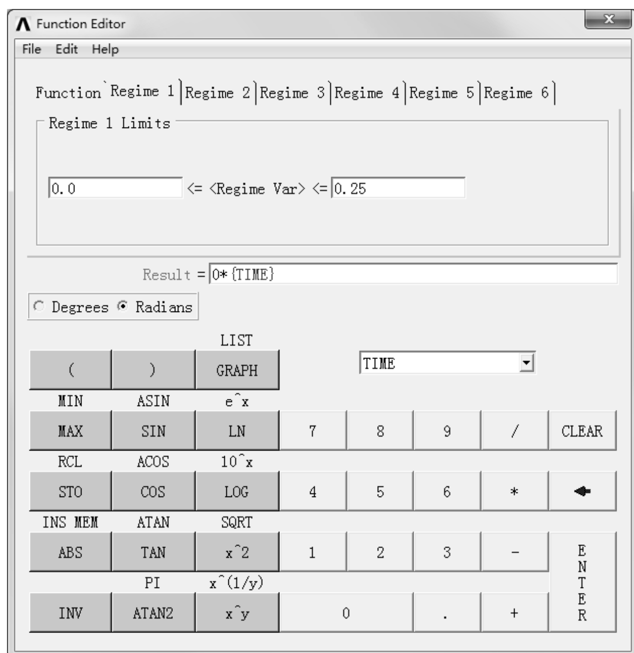
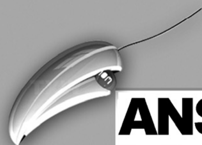


图 10-15 Function Editor 对话框-Regime 1 选项卡



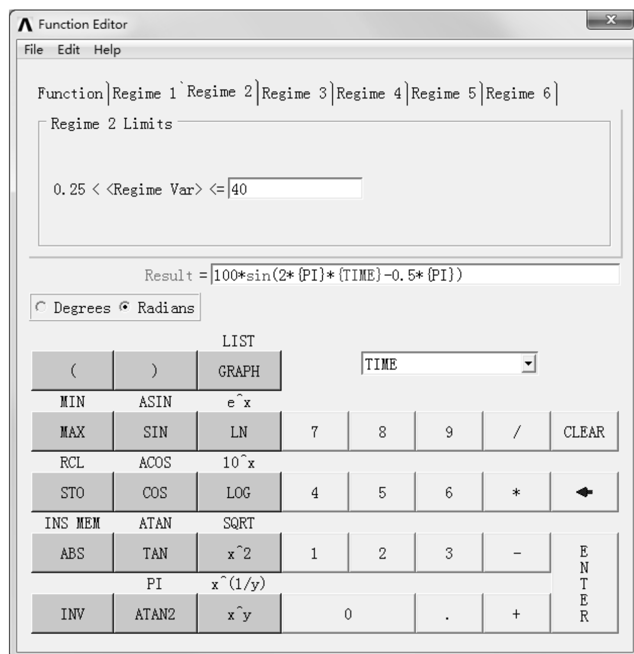


图 10-16 Function Editor 对话框-Regime 2 选项卡

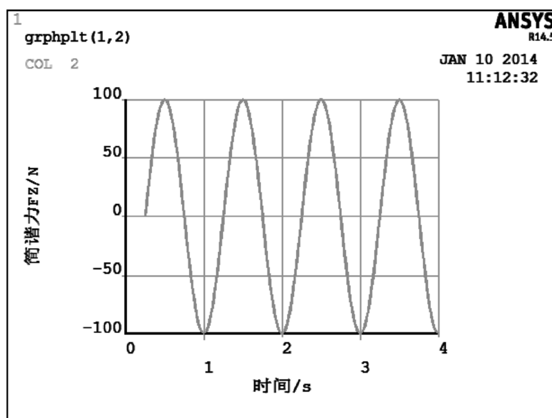


图 10-17 简谐力 F_z 的函数图像

4）将定义的函数保存为函数文件 FUNC2.func。

STEP 4 载荷定义

1）读入函数 FUNC1.func。GUI 方式为 Parameters→Functions→Read From File，打开函数 FUNC1.func，并设置 Table parameter name 为 FORCEX，如图 10-18 所示。

2）读入函数 FUNC2.func。GUI 方式为 Parameters→Functions→Read From File，打开函数 FUNC2.func，并设置 Table parameter name 为 FORCEZ，如图 10-19 所示。

3）施加简谐力 F_x。GUI 方式为 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural →Force/Monent→ On Nodes，选择质量单元节点，设置力的方向为 FX，Apply as 选择 Existing table，如图 10-20 所示。单击 OK 按钮，再选择 FORCEX，如图 10-21 所示。

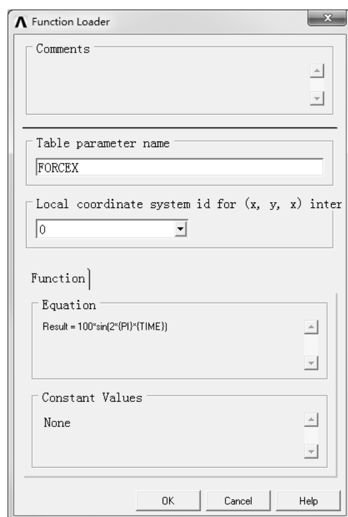


图 10-18 读入函数 FUNC1.func

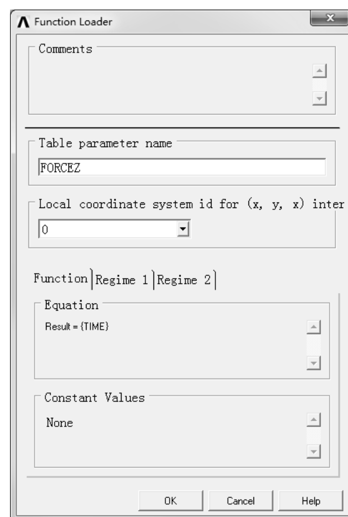


图 10-19 读入函数 FUNC2.func

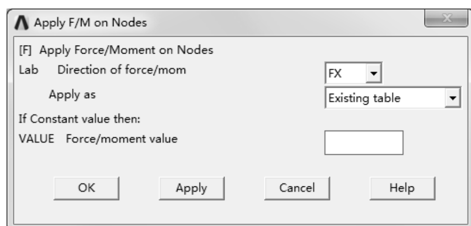


图 10-20 施加简谐力 F_x

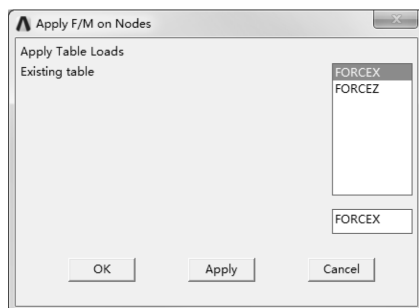


图 10-21 施加表格力 FORCEX

4）施加简谐力 F_z。GUI 方式为：Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes，选择质量单元节点，设置力的方向为 FZ，Apply as 选择 Existing Table，如图 10-22 所示。单击 OK 按钮，再选择 FORCEZ，如图 10-23 所示。

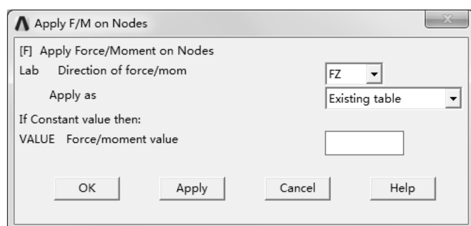


图 10-22 施加简谐力 F_z

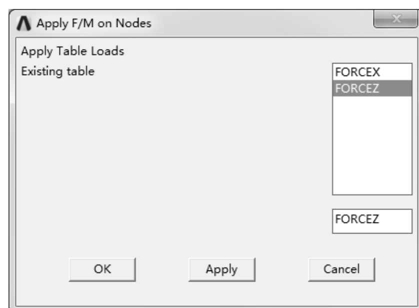


图 10-23 施加表格力 FORCEZ

STEP 5 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
```

SOLVE

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

1）进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义并绘制工作台台面中点的位移-时间曲线，如图 10-24 所示。

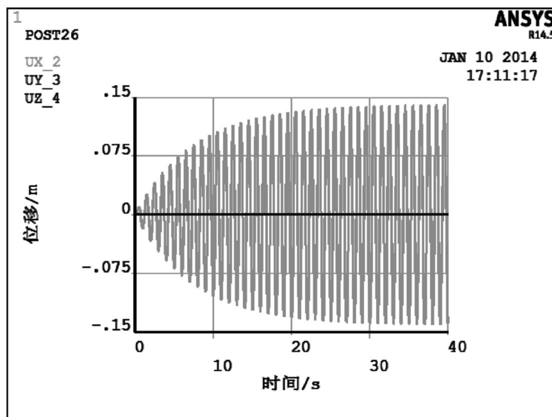


图 10-24　工作台台面中点的位移-时间曲线

由图 10-24 可知，简谐力 F_x 和 F_z 激发了工作台 X 方向的谐振（频率为 1Hz），但并未激发 Y 方向和 Z 方向的谐振。在振动初期，X 方向的振幅逐渐增大，直至达到最大振幅（0.140 405m）。

2）进入通用后处理器 POST1，查看工作台在 39.55s 时的位移云图，如图 10-25 所示。此时，工作台达到最大振幅，幅值为 0.140 405m。将瞬态动力学分析结果与谐响应分析结果（图 9-44，振幅为 0.148 565m）对比可知，两种方法的计算结果非常接近，但瞬态动力学分析还可计算结构初期的瞬态响应，而谐响应分析只能计算结构的稳态响应。

3）将阻尼系数修改为 ALPHA=0，BETA=6.366E-3，重新进行瞬态动力学分析。提取工作台台面中点的位移-时间曲线，如图 10-26 所示。

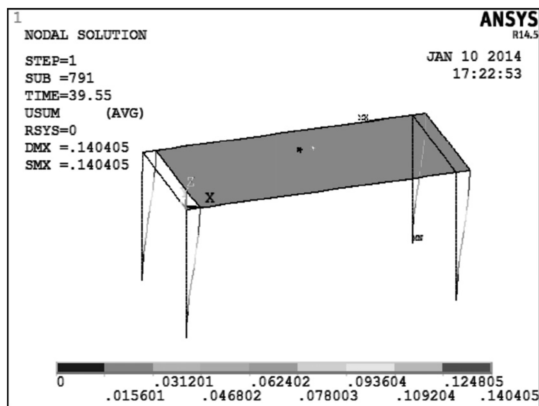


图 10-25　工作台在 39.55s 时的位移云图

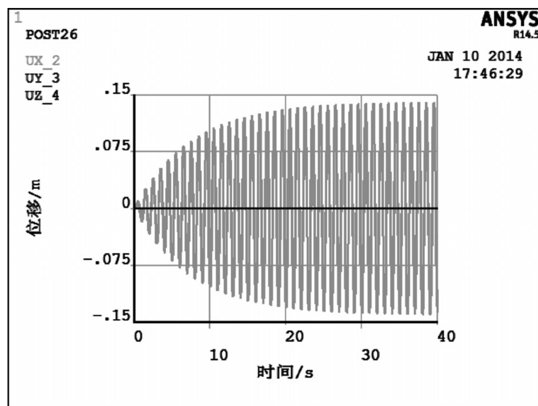


图 10-26　工作台台面中点的位移-时间曲线

对比图 10-26 和图 10-24，可知两次计算结果非常接近。这说明在许多实际问题中，ALPHA 阻尼可以忽略。在这种情形下，可以由已知的阻尼比 ξ=0.02 和主要的被激活频率 1Hz（$\omega=2\pi$），由式（10-9）计算出 BETA=6.366E-3。

10.6 有预应力的瞬态动力学分析实例

本实例在第 8.5 节的基础上，对钢丝（琴弦）进行有预应力的瞬态动力学分析。横截面形状为圆形（直径 d=0.25mm）的钢丝，在 F_1=30N 的拉力作用下绷紧于两个刚性铰支点间，在距钢丝左端点 175mm 处沿 Y 方向拨动 5mm，然后突然释放 Y 方向的约束，如图 10-27 所示。求钢丝在 X-Y 平面的瞬态响应。

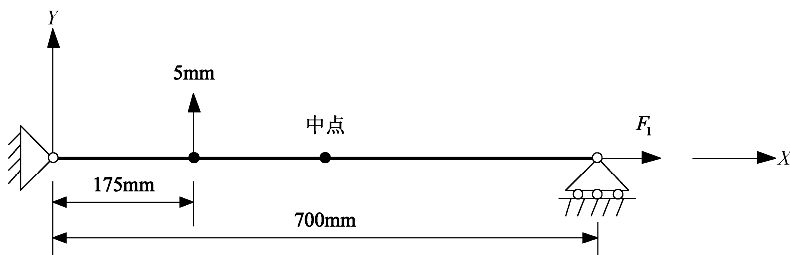


图 10-27 有预应力的钢丝

钢丝的材料特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

假定结构的恒定阻尼比为 0.02。

本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 建立有限元模型并完成静力分析和模态分析

第 8.5 节建立了钢丝的有限元模型，并完成了钢丝的预应力模态分析，在此基础上继续进行有预应力的瞬态动力学分析。

STEP 2 第一载荷步求解控制

尽管 HyperMesh 为 ANSYS 提供了部分用于瞬态动力学分析的控制卡片，但它并不能为 ANSYS 施加函数载荷和表格载荷，也不便于为瞬态动力学分析设置合适的载荷步。以下借助 ANSYS 界面完成瞬态动力学分析。

第一载荷步用于建立瞬态动力学分析的初始条件，即施加预紧拉力 F_1 和横向拨动的强制位移。初始条件为非零初始位移和零初始速度，相关设置原理详见第 10.4.3 节。

1）完成模态分析之后，退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）定义新的分析类型为瞬态动力学分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis。如图 10-28 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分析类型。

3）单击图 10-28 中的 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，保持默认设置，即完全法，单击 OK 按钮，如图 10-29 所示。

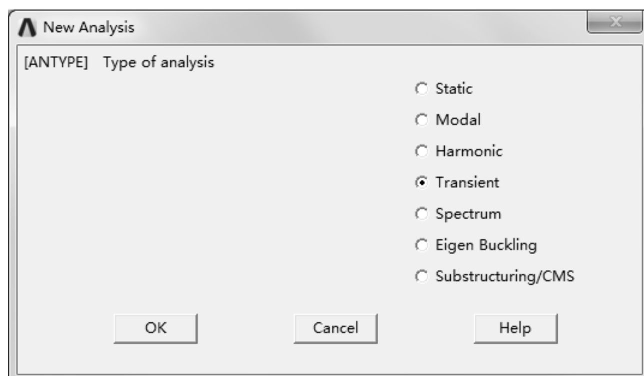


图 10-28 定义新的分析类型为 Transient

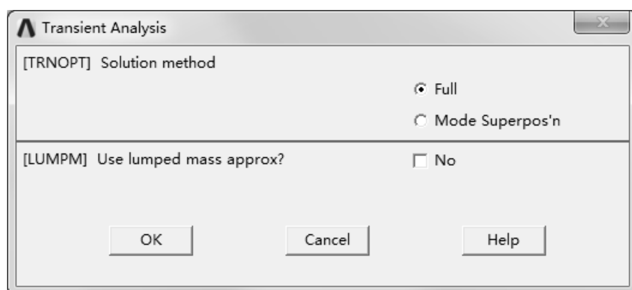


图 10-29 Transient Analysis 对话框

4）基于模态分析结果，设置瞬态动力学分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中开启大变形效应，以包含应力刚化效应，设置求解结束时间为 1E-6s，关闭时间步长控制，设置载荷子步为 2，将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步，如图 10-30 所示。在 Transient

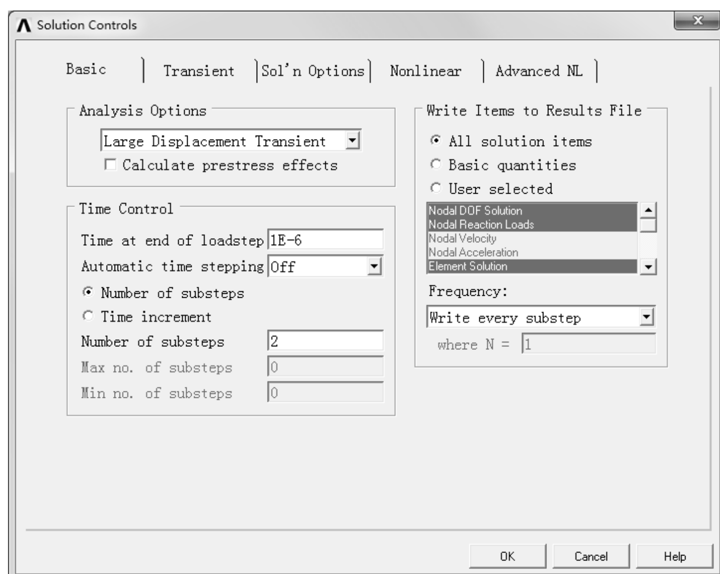


图 10-30 Solution Controls 对话框-Basic 选项卡

选项卡中关闭时间积分效应，采用阶跃载荷加载，设置阻尼系数 ALPHA=0，BETA=3.183E-5，如图 10-31 所示。

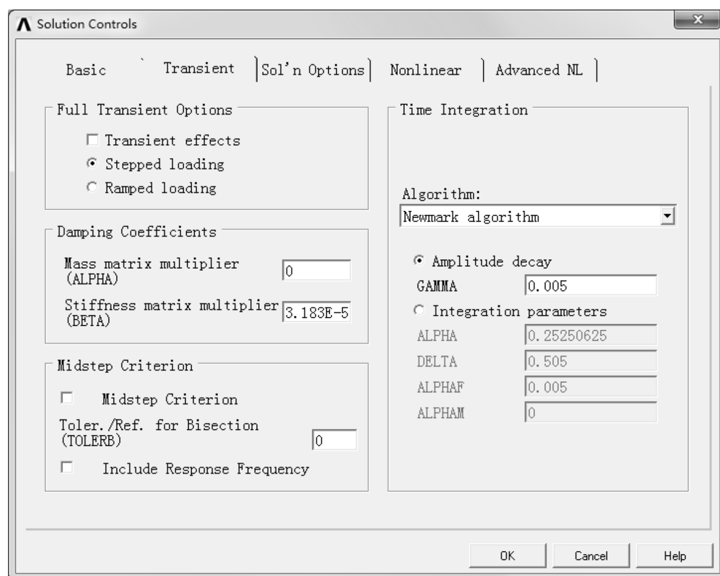


图 10-31　Solution Controls 对话框-Transient 选项卡

说明：结构的恒定阻尼比 ξ=0.02。在许多实际问题中，ALPHA 阻尼可以忽略。在这种情形下，可以由已知的阻尼比 ξ=0.02 和主要的被激活频率（第 1 阶频率，约 200Hz，$\omega = 400\pi$），由式（10-9）计算出 BETA=3.183E-5。事实上，第一载荷步为准静态分析，阻尼的设置不影响计算结果。

STEP 3 边界条件定义

1）在预应力模态分析中约束了钢丝右端节点的 UX 自由度，此时应该将其删除。

2）设置距钢丝左端点 175mm 处的节点的自由度 UY=5mm。

STEP 4 载荷定义

在预应力模态分析中删除了钢丝右端节点的拉力 F_1，此时应该重新施加拉力 F_1=30N。

STEP 5 写出载荷步 1

输入命令：

```
LSWRITE,1
```

注意：对于瞬态动力学分析，ANSYS 默认开启时间积分效应。对于某些版本的 ANSYS（如 ANSYS 14.5），图 10-31 中的设置无法关闭时间积分效应（即使不勾选 Transient effects 复选框）。应检查载荷步文件 jobname.s01 中的命令行，确保关闭了时间积分效应，正确格式应为：

```
TIMINT,OFF,STRU
```

STEP 6 第二载荷步求解控制

第二载荷步用于突然释放横向约束（5mm）之后的瞬态动力学分析。

基于模态分析结果，设置瞬态动力学分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中开启大变形效应，以包含应力刚化效应，设置求解结束时间为 0.05s，关闭时间步长控制，设置积分时间步长为 2.5E-4s，将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步，如图 10-32 所示。在 Transient 选项卡中开启时间积分效应，采用阶跃载荷加载，设置阻尼系数 ALPHA=0，BETA=3.183E-5，如图 10-33 所示。

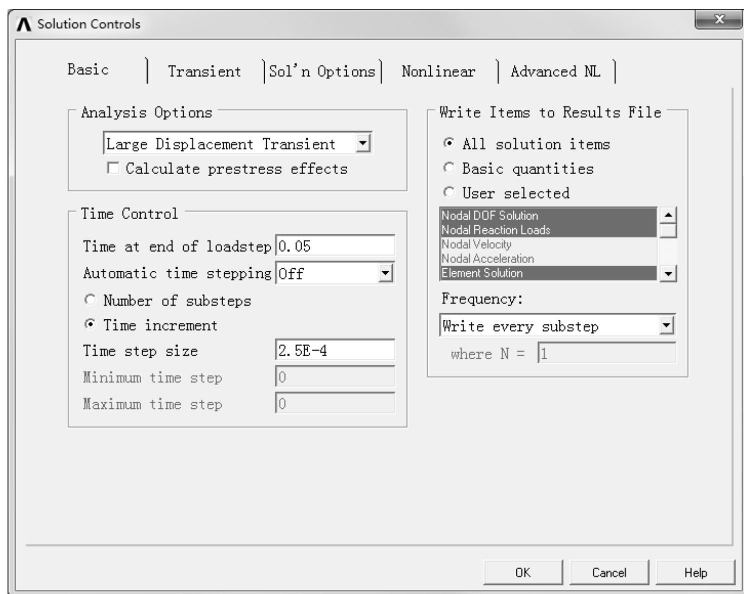


图 10-32 Solution Controls 对话框-Basic 选项卡

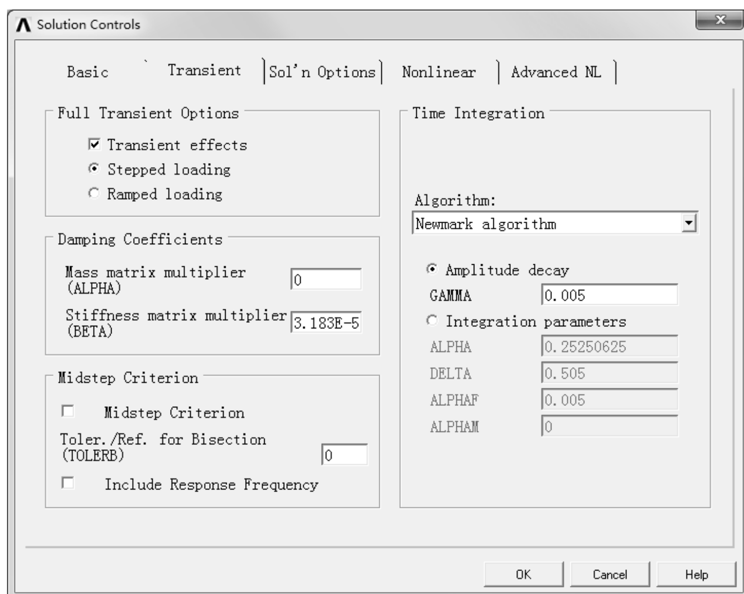


图 10-33 Solution Controls 对话框-Transient 选项卡

说明：① 积分时间步长由式（10-2）计算。钢丝有预应力的第 1 阶模态（频率约为 200Hz）对结构振动贡献最大，故取 f=200Hz，求得积分时间步长 Δt =2.5E-4s。

② 阻尼系数的设置与第一载荷步相同。

STEP 7 边界条件定义

删除距钢丝左端点 175mm 处的节点的自由度 UY，以模拟突然释放横向约束。

STEP 8 载荷定义

必须保留初始条件中的拉力 F_1，不做任何更改。

STEP 9 写出载荷步 2

输入命令：

```
LSWRITE,2
```

STEP 10 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
LSSOLVE,1,2,1
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→From LS Files

进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义并绘制钢丝中点的位移-时间曲线，如图 10-34 所示。

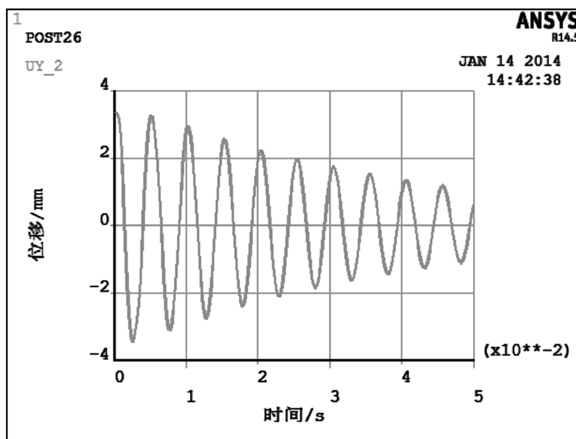


图 10-34　钢丝中点的位移-时间曲线（Y 方向）

由图 10-34 可知，突然释放横向约束之后，钢丝中点产生了自由振动。由于存在阻尼，振幅不断减小，而振动频率非常接近第 1 阶模态频率，约为 200Hz。

10.7　本章小结

1）本章基于 ANSYS，介绍了瞬态动力学分析的基本原理、分析步骤和关键技术，有助于理解 HyperMesh 的建模过程。

2）本章的两个实例源于 ANSYS 教程。尽管 HyperMesh 为 ANSYS 提供了部分用于瞬态动力学分析的控制卡片，但它并不能为 ANSYS 施加函数载荷和表格载荷，也不便于为瞬态动力学分析设置合适的载荷步。采用 HyperMesh 建立有限元模型之后，须借助 ANSYS 界面才能完成后续的分析过程。

3）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

4）尽管基于完全法的瞬态动力学分析无需进行模态分析，但为了设置合适的求解参数，如积分时间步长、阻尼系数等，在瞬态动力学分析之前，建议先进行模态分析。

5）瞬态动力学分析可包含所有类型的非线性。相对于其他分析技术，如静力分析、模态分析、谐响应分析、响应谱分析等，瞬态动力学分析更接近工程实际，因此得到广泛应用。

6）瞬态动力学分析通常包含多个载荷步，第一个载荷步常用来建立初始条件（包括预应力条件），后继载荷步则用于瞬态动力学分析。

第 11 章　响应谱分析

响应谱是单自由度系统对冲击载荷的峰值响应（不大于静态响应的两倍）与其固有频率间的函数关系曲线。响应谱分析是一种将模态分析与响应谱联系起来计算结构承受瞬态冲击载荷作用时产生的最大响应的分析技术。响应谱分析是快速进行瞬态动力学分析的一种替代解决方案，它广泛应用于核电厂建筑的地震响应分析、机电电子设备的冲击载荷分析和商业建筑的地震响应分析等。

与承受周期性载荷或简谐载荷的结构相比较，对承受冲击载荷的结构来说，阻尼对控制结构的最大响应就显得不太重要了。因为在冲击载荷作用下，结构在很短的时间内就达到了峰值响应。在这之前，阻尼还来不及从结构吸收太多的能量。因此，响应谱分析可以不计阻尼，使计算结果偏于安全。

响应谱分析基于模态分析，是一种线性分析技术。任何非线性特性，如塑性和接触（间隙）单元，即使定义了也将被忽略。

本章主要介绍了响应谱分析的基本原理和分析步骤，给出了利用 HyperMesh 进行单点响应谱分析和多点响应谱分析前处理的实例，并解释了响应谱分析的结果。

11.1　响应谱分析的类型

ANSYS 的响应谱分析分为两种类型：单点响应谱分析（Single-Point Response Spectrum，SPRS）和多点响应谱分析（Multi-Point Response Spectrum，MPRS）。单点响应谱是指在模型的一个点集（如在所有固定支撑处）定义相同的响应谱曲线；多点响应谱是指在模型的不同点集上定义不同的响应谱曲线，如图 11-1 所示。

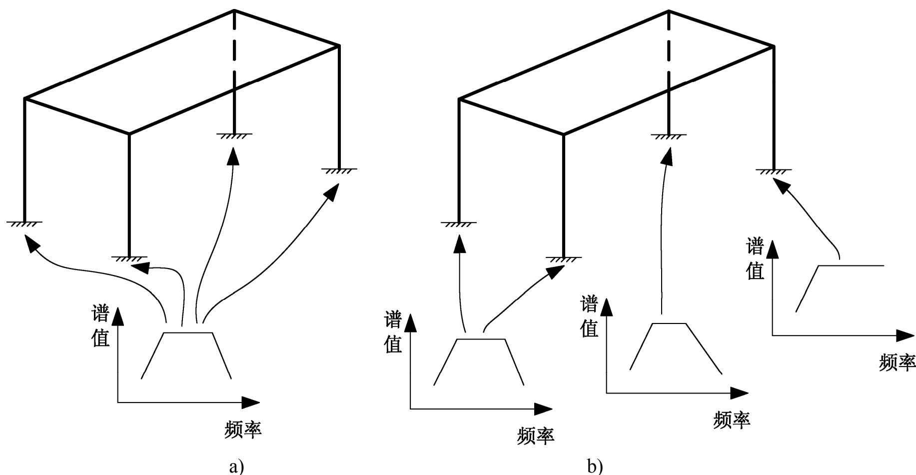
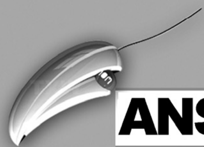


图 11-1　单点响应谱和多点响应谱

a) 单点响应谱　b) 多点响应谱



11.2 单点响应谱分析的基本步骤

STEP① 建立有限元网格模型

根据实际问题的特点，对所分析的问题进行初步计划；建立反映真实物理情况的 CAD 模型或简化的 CAD 模型，并对其划分有限元网格；定义单元类型、单元选项、实常数、截面特性和材料特性。

在进行响应谱分析时，要注意如下内容：

1）只有线性行为是有效的，如果指定了非线性单元，它们将被当做是线性的。例如，如果分析中包含了接触单元，则系统取其初始状态的刚度值，并且不再改变此刚度值。

2）材料特性可以是线性的、各向同性的或正交各向异性的、恒定的或与温度相关的。非线性材料特性将被忽略。

3）必须指定杨氏模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量）。

STEP② 获得模态解

结构的模态解，即固有频率和振型，是计算谱解所必需的。模态分析的具体过程在第 8 章中已经阐述过，这里还须注意以下几点：

1）必须使用 Block Lanczos（默认）、PCG Lanczos 或 Supernode 方法提取模态，其他方法对下一步的响应谱分析是无效的。

2）为了在谱分析中包含损失质量的影响（Missing Mass Effect），只能使用 Block Lanczos 或 PCG Lanczos 方法提取模态。当分析中忽略了高阶模态时，该选项可以减小计算误差。

3）所提取的模态数目应足以表征在感兴趣的频率范围内结构所具有的响应，模态频率范围应覆盖响应谱频率范围的 1.5 倍。

4）为了在谱分析中包含高阶模态的影响，用户可以在模态分析中计算残差向量（Residual Vector），然后在谱分析中使用残差向量，另一种方法是直接在谱分析中开启损失质量影响选项。

5）为简化分析过程并提高分析精度，在模态分析中应扩展所有模态。

6）必须在施加激励谱的位置添加自由度约束。

7）求解结束后退出 SOLUTION 处理器。

STEP③ 设置求解控制选项

模态分析完成后，重新进入求解器，并定义分析类型为谱分析（ANTYPE,SPECTR），再通过 Spectrum Analysis（谱分析）对话框设置求解选项，如图 11-2 所示。图中定义了单点响应谱分析，并设置求解所需的模态数为 12。

STEP④ 施加载荷

响应谱的类型可以是位移谱、速度谱、加速度谱、力谱或 PSD。除力谱外，其余所有类型的响应谱都是地震谱，即假定它们都作用于结构的基础上。谱值-频率曲线既可通过 GUI 方式定义，也可通过命令流方式定义，详见第 11.4 节。

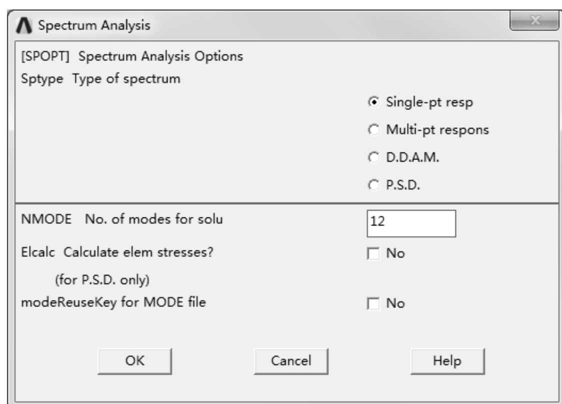


图 11-2 Spectrum Analysis 对话框

STEP 5 合并模态

对于单点响应谱分析，ANSYS 提供了 6 种模态合并方法：

1）SRSS 法（Square Root of Sum of Squares）。

2）CQC 法（Complete Quadratic Combination）。

3）DSUM 法（Double Sum）。

4）GRP 法（Grouping）。

5）NRLSUM 法（Naval Research Laboratory Sum）。

6）ROSE 法（Rosenblueth）。

模态合并方法的具体实例详见第 11.4 节。

STEP 6 求解

在执行求解命令之前，可将当前模型进行备份，以便将来恢复模型。

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

STEP 7 查看结果

单点响应谱分析的结果是以 POST1 命令的形式写入模态合并文件（Jobname.mcom）中的，这些命令依据模态合并方法指定的某种方式计算结构的最大响应。响应包括总位移（或速度，或加速度）、总应力（或应力速度，或应力加速度）、总应变（或应变速度，或应变加速度）和总反作用力（或总反作用力速度，或总反作用力加速度）。

首先进入通用后处理器 POST1，再读入 Jobname.mcom 文件，查看结果。

11.3 多点响应谱分析的基本步骤

STEP 1 建立有限元网格模型

该步骤与单点响应谱分析完全相同。

STEP 2 获得模态解

该步骤与单点响应谱分析完全相同。

STEP 3 设置求解控制选项

模态分析完成后，重新进入求解器，并定义分析类型为谱分析（ANTYPE,SPECTR），再通过 Spectrum Analysis 对话框设置求解选项，如图 11-3 所示。图中定义了多点响应谱分析，并设置求解所需的模态数为 12。

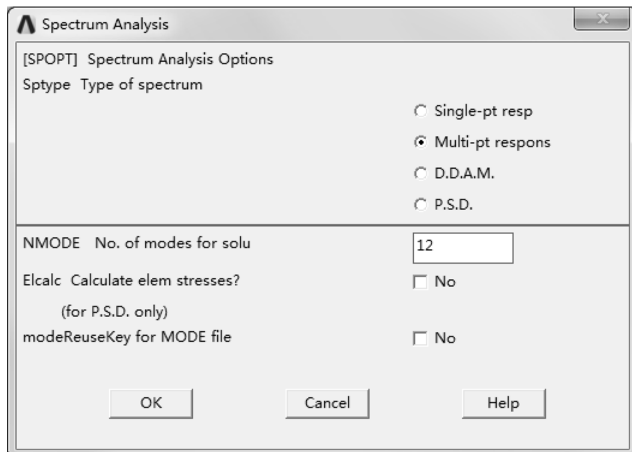


图 11-3 Spectrum Analysis 对话框

STEP 4 施加载荷

响应谱的类型可以是位移谱、速度谱、加速度谱、力谱或压力谱。谱值-频率曲线应通过命令流方式定义，详见第 11.5 节。

STEP 5 计算参与系数

参与系数代表每阶模态在特定方向上对变形（应力）的贡献，详见第 11.5 节。需要注意的是，对每一组响应谱，须重复执行第 4、5 步。

STEP 6 合并模态

该步骤与单点响应谱分析完全相同。

STEP 7 求解

该步骤与单点响应谱分析完全相同。

STEP 8 查看结果

该步骤与单点响应谱分析完全相同。

11.4 单点响应谱分析实例

板壳-梁结构如图 11-4 所示，计算结构在 Y 方向位移响应谱（见表 11-1）作用下的响应。已知条件如下：

1）板壳厚度为 0.005m。

2）梁截面为正方形，边长为 0.01m。

3）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 2.1×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

4）本例采用国际单位制。

表 11-1 位移响应谱

频率/Hz	0.5	1.0	2.4	3.8	17	18	20	32
位移/mm	1.0	0.5	0.9	0.8	1.2	0.75	0.86	0.2

STEP 1 网格划分

本例的几何模型较简单，可利用 HyperMesh 建立面和线的几何模型，再划分网格。

1）灵活利用 Geom 页面中的 nodes、lines 和 surfaces 面板，建立板壳-梁结构的几何模型，并放置于 Geometry 组件集，如图 11-5 所示。

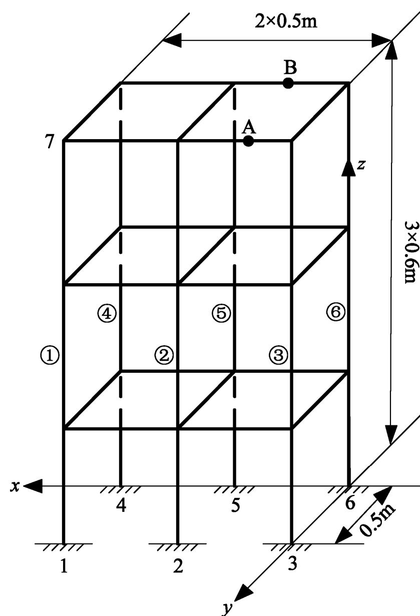


图 11-4 板壳-梁结构模型

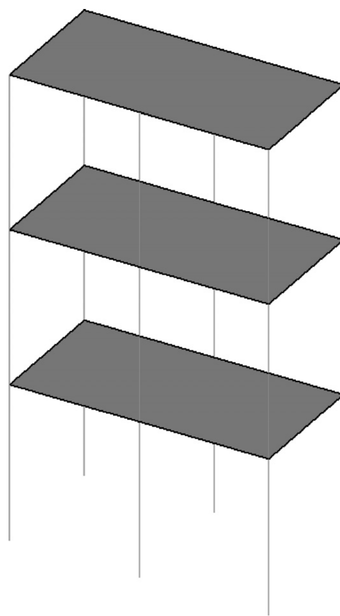


图 11-5 板壳-梁结构的几何模型

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将 3 层板面分别划分为边长为 0.1m 的四边形单元（共 150 个），并放置于 Shell 组件集。

3）利用 1D 页面中的 line mesh 面板，按图 11-6 所示设置网格划分参数，将 6 个支腿分别划分为 18 个梁单元，并放置于 Beam 组件集。需要注意的是，方向节点（direction node）应选择 z direction，编号为①、②、③的支腿应选择 A 点作为方向节点，编号为④、⑤、⑥的支腿应选择 B 点作为方向节点。

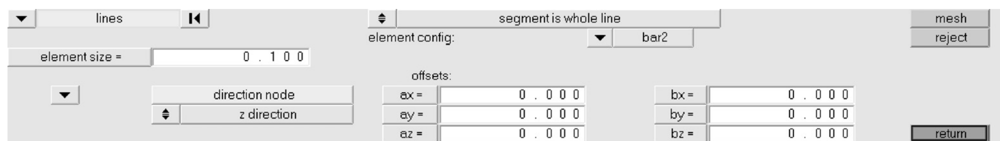


图 11-6 line mesh 面板

4）利用 Tool 页面中的 edges 面板检查支腿和板面是否正确连接，必要时需要耦合节点。对于本例，梁单元与板壳单元的连接可采用节点耦合法。

5）除应用于单点响应谱分析外，本节的有限元模型还将应用于多点响应谱分析和随机振动分析。利用 Analysis 页面中的 entity sets 面板，创建 BASE1 节点集，包含图 11-4 中编号为 1、2、3 的节点，创建 BASE2 节点集，包含图 11-4 中编号为 4、5、6 的节点。创建节点集的目的是方便进行载荷加载。

图 11-7 为板壳-梁结构的有限元网格模型（含边界条件）。

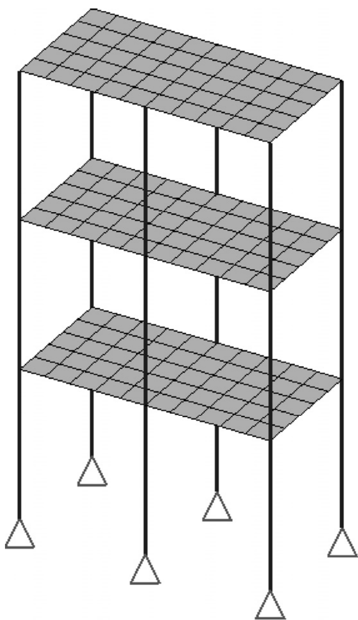


图 11-7　板壳-梁结构的有限元网格模型（含边界条件）

STEP 2 单元定义

1）利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。板面选用 SHELL181 单元，并设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible），采用非协调模式的完全积分方法，以提高计算精度。

2）支腿选用 BEAM188 单元，并设置单元选项 K3=3（Cubic Form），即设置单元形函数为三次式，以获取较高的计算精度。

STEP 3 定义梁截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Leg，Section type 为 BEAM，Sub section type 为 RECT，勾选 Define by HyperBeam 复选框，并选择 New section 单选按钮，如图 11-8 所示。

3）单击 Creat/Edit 按钮，弹出 HyperBeam 数据浏览器。在左下方的 Parameters Definition 中，设置 Dimension（a）=0.01m，Dimension（b）=0.01m。

4）执行菜单命令 File→Exit，退出 HyperBeam 数据浏览器，返回 Create Section 对话框。

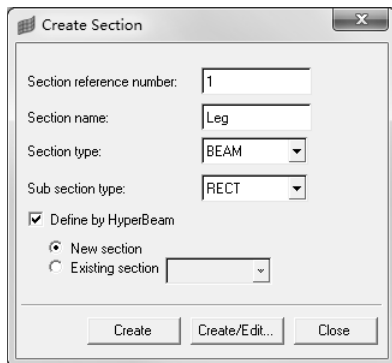


图 11-8 Create Section 对话框

STEP 4 定义板壳截面

1）在 Create Section 对话框中，设置 Section name 为 Table，Section type 改为 SHELL。单击 Create/Edit 按钮，弹出板壳横截面设置卡片。设置 PLIES=1，表示单层板壳。设置 TK=0.005，定义板壳的厚度为 0.005m。设置 NUMPT（1）=3，定义沿板壳厚度方向的积分点个数为 3，这是 ANSYS 的默认值，如图 11-9 所示。最后单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

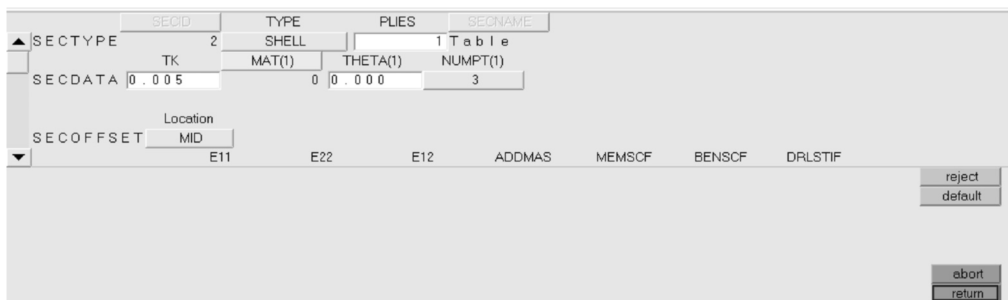


图 11-9 板壳横截面设置卡片

2）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

3）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 5 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为板面和支腿定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E11Pa，泊松比 NUXY 为 0.3，密度 DENS 为 7850kg/m^3。

STEP 6 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Shell 组件集和 Beam 组件集赋予相应的单元、横截面和材料。

STEP 7 边界条件定义

利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束 6 个支腿底部节点的 6 个自由度，并将约束载荷放置于 constraints 载荷集，如图 11-7 所示。

STEP 8 模态分析求解控制

结构的模态解，即固有频率和振型，是计算谱解所必需的。在执行响应谱分析之前，必须先完成模态分析。

在 Analysis 页面中，利用 control cards 面板设置控制卡片。

1）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

2）单击 ANTYPE 按钮，将 type 由 STATIC 切换为 MODAL，定义分析类型为模态分析，如图 11-10 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

3）单击 MODOPT 按钮，确认 method 为 LANB，将 nmode 设置为 12，其余选项保持默认设置，如图 11-11 所示。MODOPT 命令指定了模态的提取方法为 Block Lanczos，模态的提取阶数为 12。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 11-10 ANTYPE 命令

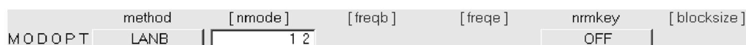


图 11-11 MODOPT 命令

4）单击 EQSLV 按钮，将 Lab 由 FRONT 切换为 SPARSE，指定方程求解器为稀疏矩阵求解器，如图 11-12 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 MXPAND 按钮，将 NMODE 设置为 12，将 Elcalc 切换为 YES，如图 11-13 所示。MXPAND 命令指定了模态的扩展阶数为 12，并开启计算单元结果选项。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 11-12 EQSLV 命令



图 11-13 MXPAND 命令

6）单击 LUMPM 按钮，保持默认设置，采用一致质量矩阵，如图 11-14 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

7）单击 PSTRES 按钮，保持默认设置，不考虑预应力，如图 11-15 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 11-14 LUMPM 命令



图 11-15 PSTRES 命令

8）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

当前的控制卡片如图 11-16 和图 11-17 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 11-16 控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 11-17　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 8 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,MODAL,NEW
MODOPT,LANB,12,0,0,,OFF
EQSLV,SPARSE
MXPAND,12,,,YES,0.001
LUMPM,OFF
PSTRES,OFF
SOLVE
```

STEP 9 求解并查看模态分析结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Shell_beam_modal.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Shell_beam_modal.cdb 文件，并自动进行模态分析。表 11-2 为板壳-梁结构的前 12 阶模态频率。可见，模态频率范围已覆盖响应谱频率范围的 1.5 倍（48Hz）。图 11-18～图 11-29 为板壳-梁结构的前 12 阶模态振型。

表 11-2　板壳-梁结构的前 12 阶模态频率

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶	11 阶	12 阶
频率/Hz	2.6638	2.7205	3.9141	8.3730	8.4891	12.198	14.100	14.161	20.606	45.736	47.021	49.472

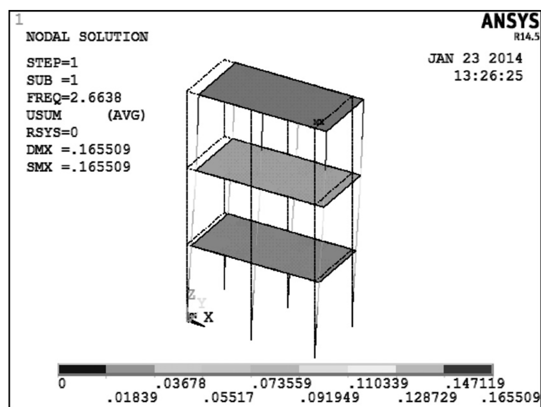


图 11-18　第 1 阶模态振型

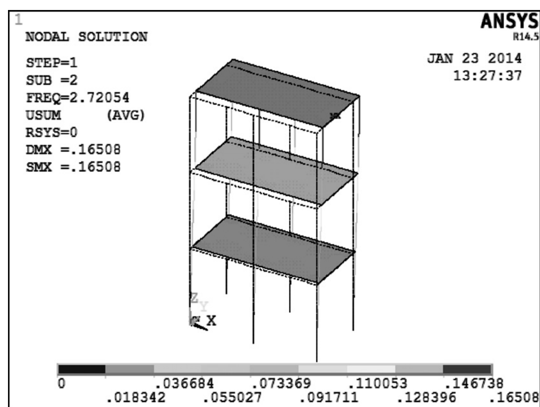


图 11-19　第 2 阶模态振型

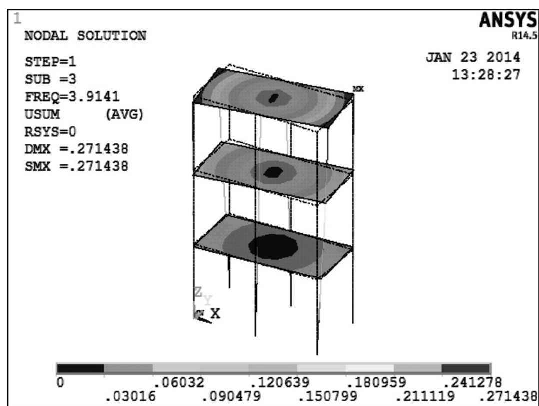


图 11-20 第 3 阶模态振型

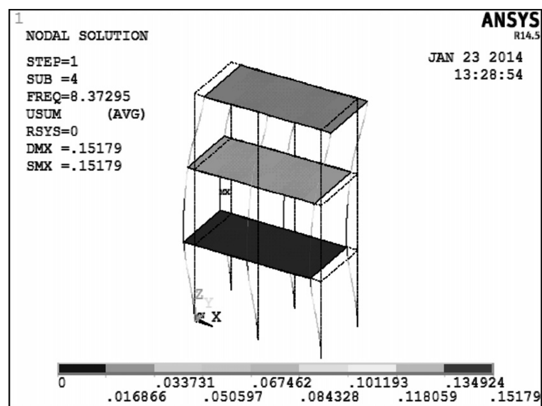


图 11-21 第 4 阶模态振型

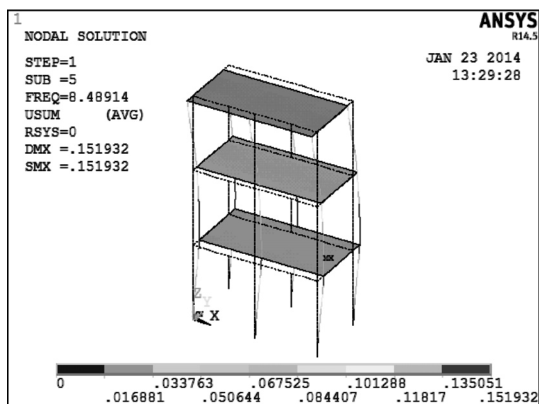


图 11-22 第 5 阶模态振型

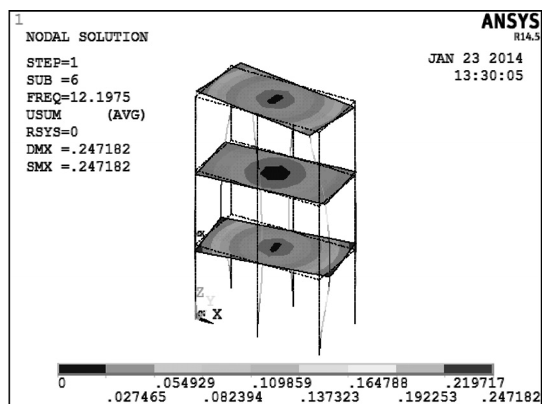


图 11-23 第 6 阶模态振型

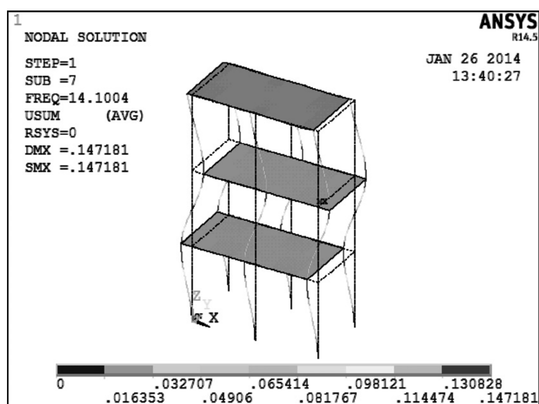


图 11-24 第 7 阶模态振型

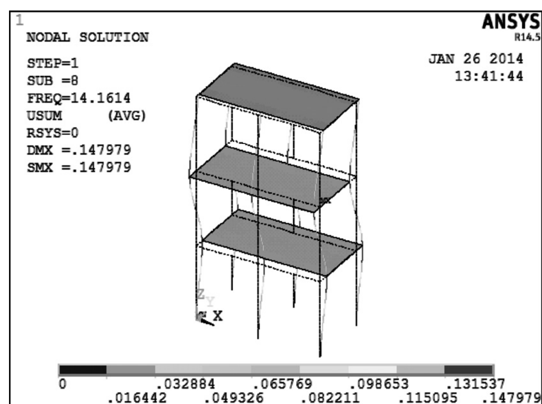


图 11-25 第 8 阶模态振型

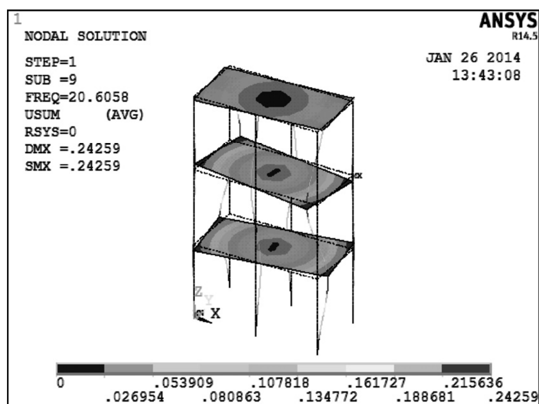


图 11-26 第 9 阶模态振型

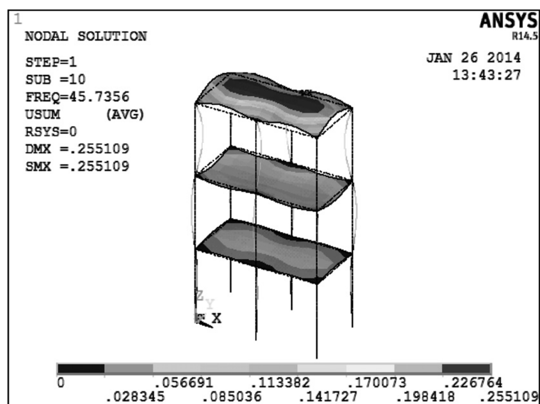


图 11-27 第 10 阶模态振型

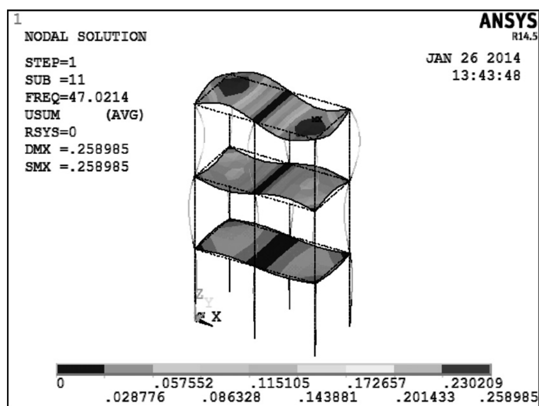


图 11-28 第 11 阶模态振型

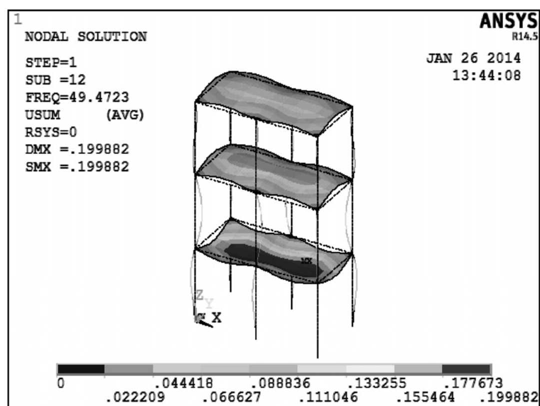


图 11-29 第 12 阶模态振型

STEP 10 单点响应谱分析求解控制

完成模态分析之后，必须借助 ANSYS 界面才能完成后续的单点响应谱分析。

1）退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）定义新的分析类型为谱分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis。如图 11-30 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分析类型。

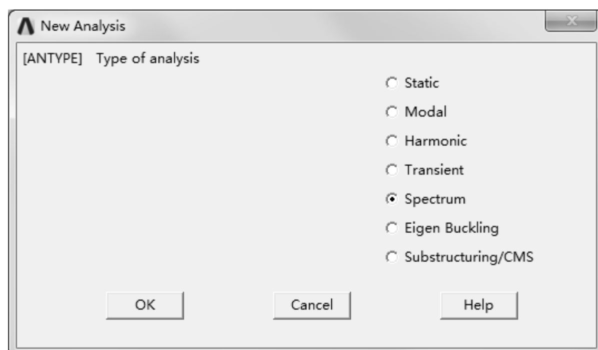


图 11-30 定义新的分析类型为 Spectrum

3）设置单点响应谱分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，选择 Single-pt resp，并设置求解所需的模态数为 12，如图 11-31 所示。由模态分析可知，前 12 阶模态频率范围已覆盖响应谱频率范围的 1.5 倍。

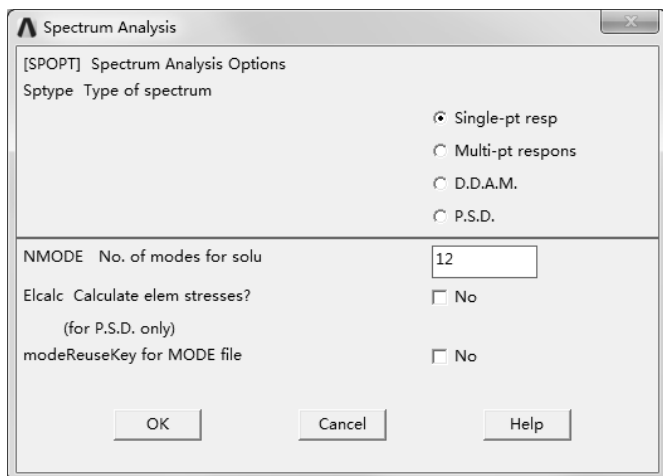


图 11-31　Spectrum Analysis 对话框

STEP 11 载荷定义

1）设置载荷步选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Single Point→Settings。设置响应谱的类型为 Seismic displac，即地震位移谱，作用于结构的固定支撑处（6 个支腿底部节点）。激励方向由 Excitation direction 指定，通过笛卡儿坐标定义一个方向矢量来关联激励方向，本例的载荷为 *Y* 方向，故应设置 SEDX=0，SEDY=1，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 11-32 所示。

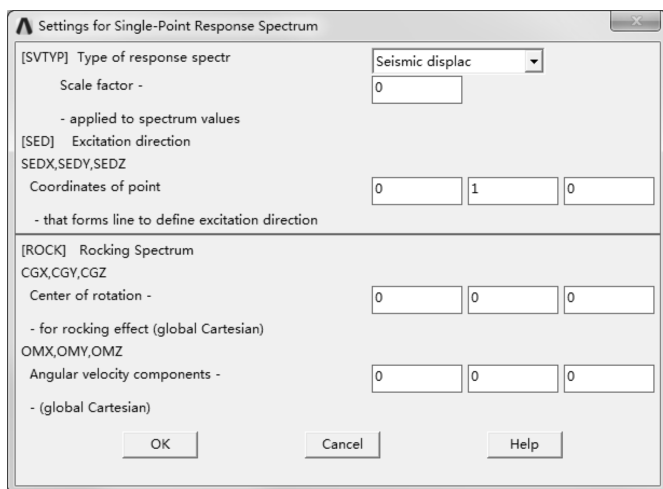


图 11-32　Settings for Single-Point Response Spectrum 对话框

2）设置频率表，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Single Point→Freq Table。将表 11-1 中的频率值输入频率表，如图 11-33 所示。

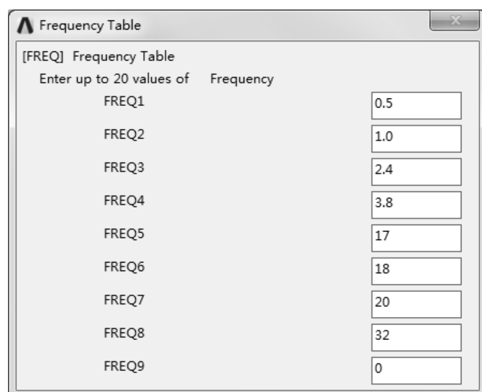


图 11-33 输入频率值

3）设置谱值，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Single Point →Spectr Values，弹出 Spectrum Values-Damping Ratio 对话框。对于响应谱分析，可设置阻尼为零（默认值），使计算结果偏于安全，如图 11-34 所示。单击图 11-34 中的 OK 按钮，弹出 Spectrum Values 对话框。将表 11-1 中的谱值（位移）输入谱值表，如图 11-35 所示。

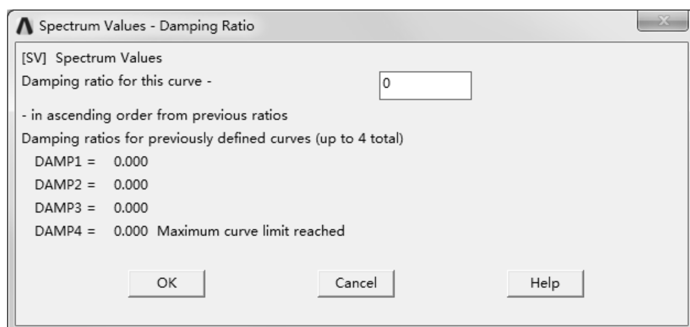


图 11-34 设置阻尼比

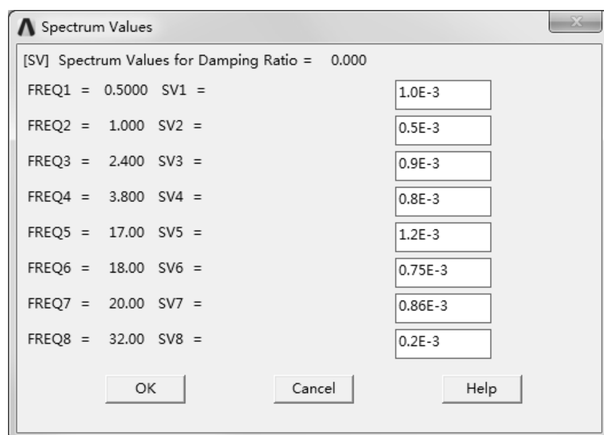


图 11-35 输入谱值

STEP 12 合并模态

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Single Point→Mode Combine，设置模态提取方法为 SRSS，设置 AbsSumKey method 为空白，其余选项保持默认值，如图 11-36 所示。

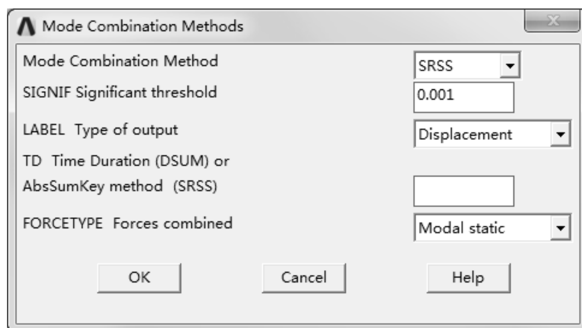


图 11-36　设置模态合并方法

STEP 13 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

首先进入通用后处理器 POST1，再读入 Jobname.mcom 文件，GUI 方式为 File→Read Input from。图 11-37 为板壳-梁结构的位移云图，图 11-38 为板壳-梁结构的 von Mises 应力云图。

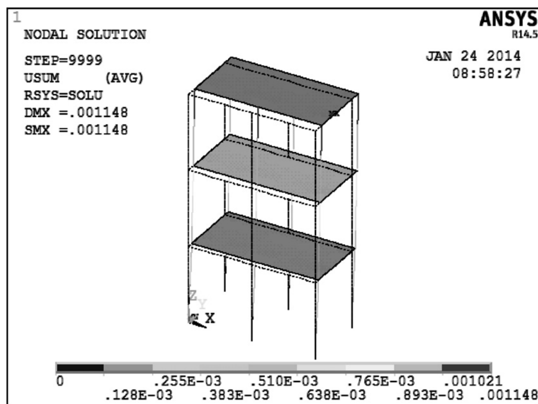


图 11-37　板壳-梁结构的位移云图

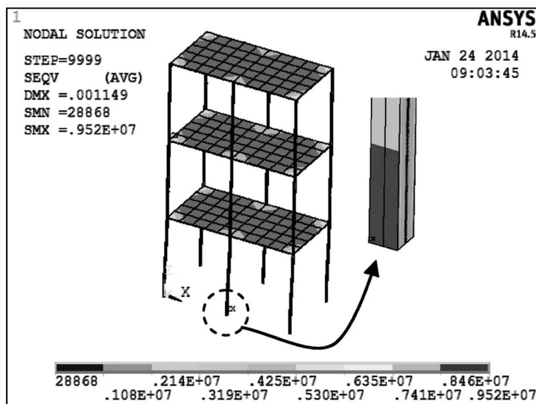


图 11-38　板壳-梁结构的 von Mises 应力云图

由图 11-37 和图 11-38 可知，在单点响应谱的作用下，板壳-梁结构的最大位移为 1.148mm，位于最上层板面，最大 von Mises 应力为 9.52MPa，位于支腿的底部。

11.5　多点响应谱分析实例

板壳-梁结构如图 11-39 所示，编号为 1、2、3 的节点受到 *Y* 方向的位移响应谱（见表 11-3）作用，编号为 4、5、6 的节点受到 *X* 方向的位移响应谱（见表 11-3）作用，计算结构在多点响应谱作用下的响应。已知条件如下：

1）板壳厚度为 0.005m。

2）梁截面为正方形，边长为 0.01m。

3）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 2.1×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

4）本例采用国际单位制。

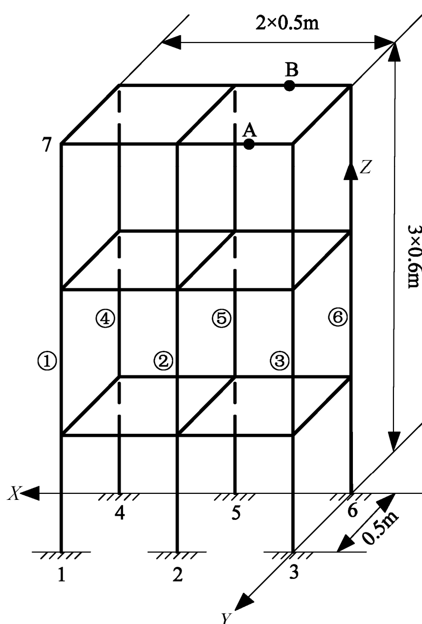


图 11-39　板壳-梁结构模型

表 11-3　位移响应谱

频率/Hz	0.5	1.0	2.4	3.8	17	18	20	32
位移/mm	1.0	0.5	0.9	0.8	1.2	0.75	0.86	0.2

STEP 1 建立有限元模型并完成模态分析

第 11.4 节建立了板壳-梁结构的有限元模型，并完成了模态分析，在此基础上继续进行多点响应谱分析。

STEP 2 多点响应谱分析求解控制

完成模态分析之后，必须借助 ANSYS 界面才能完成后续的多点响应谱分析。

1）退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）定义新的分析类型为谱分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New

Analysis。如图 11-40 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分析类型。

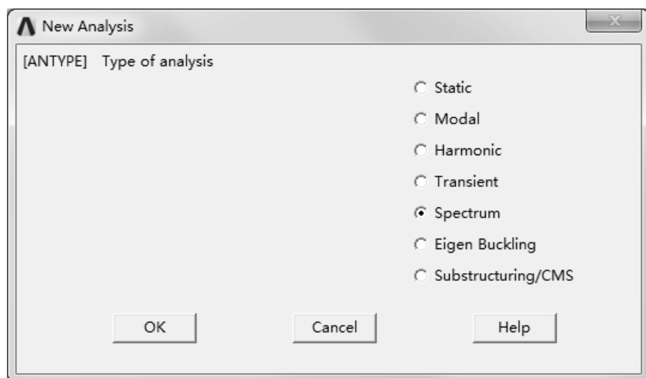


图 11-40　定义新的分析类型为 Spectrum

3）设置多点响应谱分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，选择 Multi-pt respons，并设置求解所需的模态数为 12，如图 11-41 所示。由模态分析可知，前 12 阶模态频率范围已覆盖响应谱频率范围的 1.5 倍。

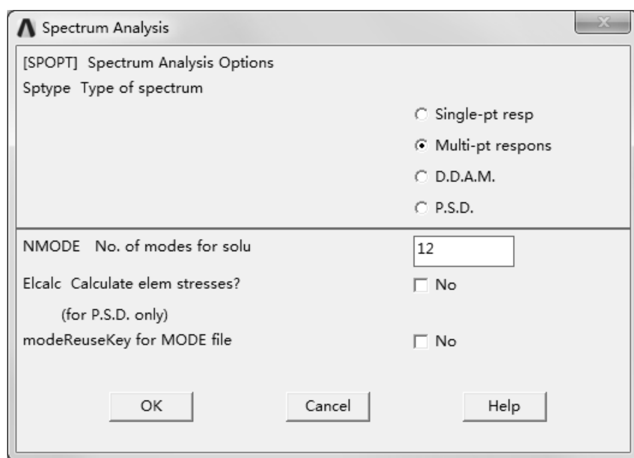


图 11-41　Spectrum Analysis 对话框

STEP 3 定义载荷 1

载荷 1 为施加于 BASE1 节点集（不含 BASE2 节点集）的 *Y* 方向的位移响应谱。

1）设置载荷步选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Multi Point→Settings。设置响应谱的类型为 Displacement，即位移谱，作用于编号为 1、2、3 的节点，即 BASE1 节点集。响应谱的编号设为 1。激励方向由 Excitation direction in global Cartesian 指定，通过笛卡儿坐标定义一个方向矢量来关联激励方向，响应谱 1 作用于 *Y* 方向，故应设置 SEDX=0，SEDY=1，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 11-42 所示。

2）对于多点响应谱分析，应使用命令流方式定义谱值-频率曲线。按如下命令流定义表 11-3 中的频率和谱值：

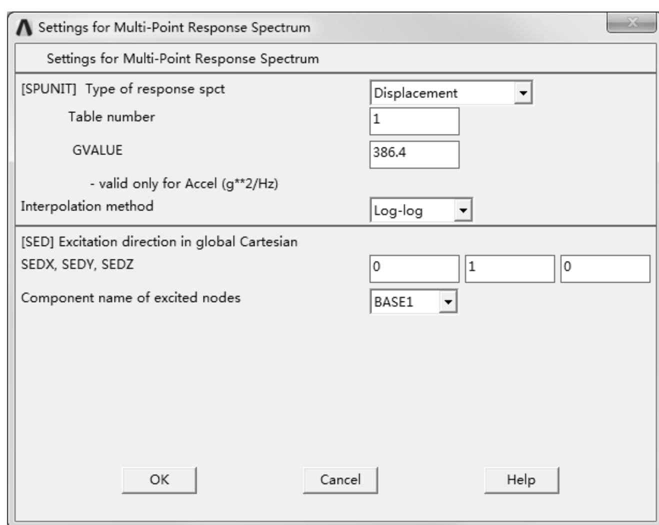


图 11-42　Settings for Multi-Point Response Spectrum 对话框

```
spfreq,1,0.5,1.0,2.4,3.8,17                    !定义频率
spfreq,1,18,20,32                              !定义频率
spval,1,,1.0E-3,0.5E-3,0.9E-3,0.8E-3,1.2E-3    !定义谱值
spval,1,,0.75E-3,0.86E-3,0.2E-3                !定义谱值
```

STEP 4 计算参与系数 1

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Multi Point→Calculate PF，保持默认设置，如图 11-43 所示。单击 OK 按钮，ANSYS 将计算参与系数 1，可以在 ANSYS 的输出窗口中看到计算结果，如图 11-44 所示。

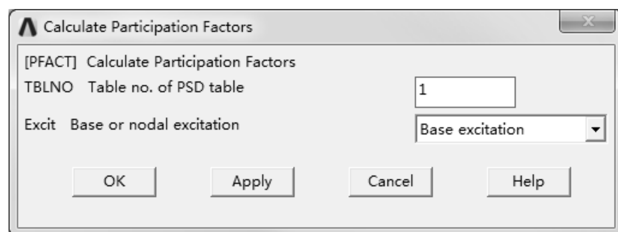


图 11-43　计算参与系数 1

```
***** PARTICIPATION FACTORS FOR BASE EXCITATION NO.   1 *****    TABLE NO.   1

MODE   VALUE        MODE   VALUE        MODE   VALUE        MODE   VALUE

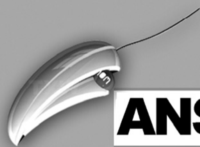
  1 -0.11328E-07     2   -3.7969         3 -0.70993E-09     4  0.55282E-09
  5   -1.3124        6  0.85651E-10      7  0.28677E-09     8 -0.64893
  9 -0.37998E-11    10  0.46733E-01     11  0.17679E-09    12 -0.97668E-01
```

图 11-44　参与系数 1

STEP 5 定义载荷 2

载荷 2 为施加于 BASE2 节点集（不含 BASE1 节点集）的 *X* 方向的位移响应谱。

1）首先应删除施加到 BASE1 节点集的载荷，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Multi Point→Settings。设置响应谱的类型为 Displacement，作用于 BASE1 节点集。响应谱的编号设为 2。设置 SEDX=0，SEDY=0，SEDZ=0。其余选项保持默



认值，如图 11-45 所示。单击 OK 按钮，即将 BASE1 节点集的载荷删除。

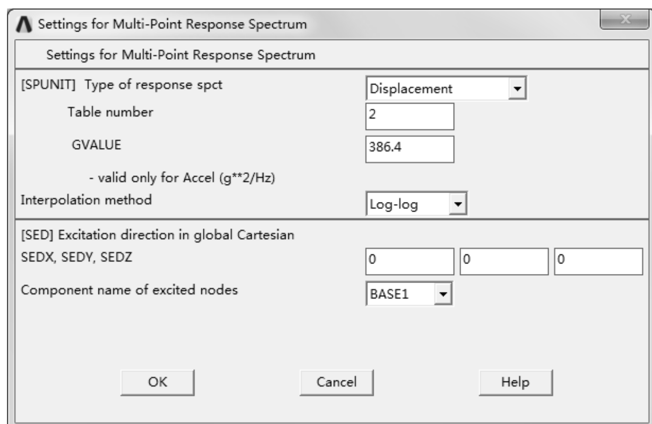


图 11-45　Settings for Multi-Point Response Spectrum 对话框

2）设置 BASE2 节点集的载荷，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Multi Point→Settings。设置响应谱的类型为 Displacement，作用于编号为 4、5、6 的节点，即 BASE2 节点集。响应谱的编号设为 2。响应谱 2 作用于 *X* 方向，故应设置 SEDX=1，SEDY=0，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 11-46 所示。

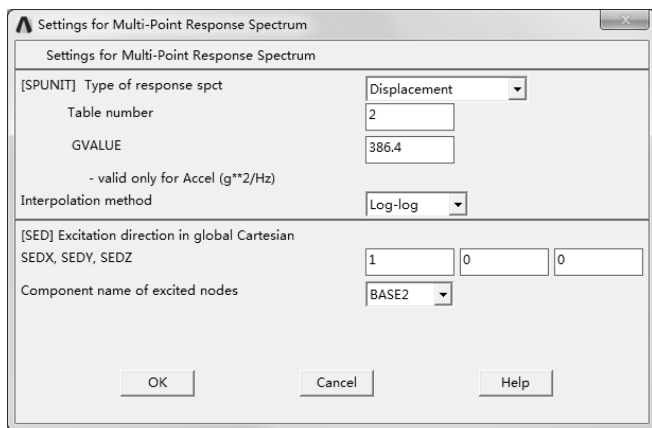


图 11-46　Settings for Multi-Point Response Spectrum 对话框

3）使用命令流方式定义谱值-频率曲线，按如下命令流定义表 11-3 中的频率和谱值：

```
spfreq,2,0.5,1.0,2.4,3.8,17                  !定义频率
spfreq,2,18,20,32                            !定义频率
spval,2,,1.0E-3,0.5E-3,0.9E-3,0.8E-3,1.2E-3  !定义谱值
spval,2,,0.75E-3,0.86E-3,0.2E-3              !定义谱值
```

STEP 6 计算参与系数 2

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Multi Point→Calculate PF，设置表格号为 2。如图 11-47 所示。单击 OK 按钮，ANSYS 将计算参与系数 2，可以在 ANSYS 的输出窗口中看到计算结果，如图 11-48 所示。

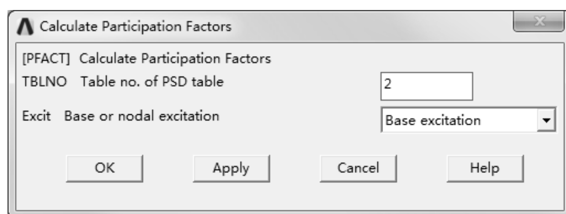


图 11-47 计算参与系数 2

```
***** PARTICIPATION FACTORS FOR BASE EXCITATION NO.   2 *****    TABLE NO.   2

MODE    VALUE       MODE    VALUE       MODE    VALUE       MODE    VALUE

  1  -3.7911          2  0.11981E-07    3  -1.2908          4   1.3222
  5  0.56375E-09      6 -0.46368        7  0.66191          8  0.27230E-09
  9 -0.24038         10  0.63034E-10   11 -0.15726E-01     12  0.14955E-09
```

图 11-48 参与系数 2

STEP 7 合并模态

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→Single Point→Mode Combine，设置模态提取方法为 SRSS，设置 AbsSumKey method 为空白，其余选项保持默认值，如图 11-49 所示。

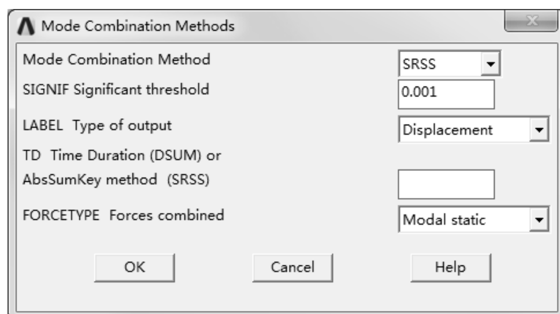


图 11-49 设置模态合并方法

STEP 8 求解并查看结果

执行求解命令：

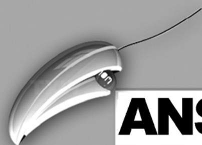
```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

首先进入通用后处理器 POST1，再读入 Jobname.mcom 文件，GUI 方式为 File→Read Input from。图 11-50 为板壳-梁结构的位移云图，图 11-51 为板壳-梁结构的 von Mises 应力云图。

由图 11-50 和图 11-51 可知，在多点响应谱的作用下，板壳-梁结构的最大位移为 0.870mm，位于最上层板面，最大 von Mises 应力为 7.08MPa，位于支腿的底部。



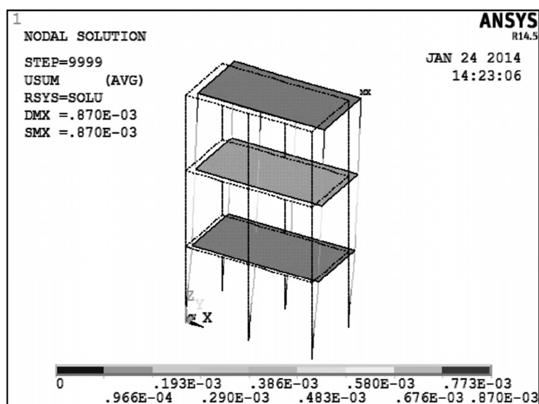


图 11-50 板壳-梁结构的位移云图

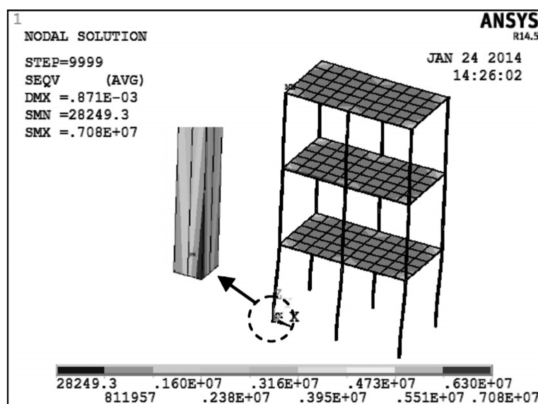


图 11-51 板壳-梁结构的 von Mises 应力云图

11.6 本章小结

1）本章基于 ANSYS，介绍了响应谱分析的基本原理和分析步骤，有助于理解 HyperMesh 的建模过程。

2）本章的两个实例源于 ANSYS 教程。在响应谱分析之前，必须首先进行模态分析。可利用 HyperMesh 建立有限元模型，并完成模态分析设置，后续的响应谱分析则必须借助 ANSYS 界面才能完成。值得注意的是，单点响应谱分析和多点响应谱分析的过程有所不同，本章的两个实例给出了详细的分析过程。

3）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

4）响应谱分析是一种将模态分析与响应谱联系起来计算结构承受瞬态冲击载荷作用时产生的最大响应的分析技术，是快速进行瞬态动力学分析的一种替代解决方案。为了更精确地分析结构的动态特性，应进行瞬态动力学分析。



第 12 章　随机振动分析

随机振动分析用于确定结构在随机载荷作用下的响应。目前，随机振动分析在车辆、土木结构、机载电子设备等的设计上得到了广泛应用。与确定性振动不同，随机振动服从概率统计规律，只能用概率统计方法描述，我们只能知道物理量的统计值，如均值、均方根值、标准方差等。

ANSYS 采用功率谱密度（Power Spectral Density，PSD）谱作为随机振动分析的载荷输入。功率谱密度是一种概率统计方法，是对随机变量均方根值的量度，包含了随机振动的能量和频率信息。功率谱密度谱是一条功率谱密度值-频率值的关系曲线，其中功率谱密度可以是位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度等形式，它们的单位是（物理单位）^{2}/Hz。在数学上，功率谱密度值-频率值关系曲线下的面积就是方差，即标准方差的平方值。

在 ANSYS 中，假定随机振动输入的均值为零，且满足正态（高斯）分布。同样，随机振动响应的均值也为零，且满足正态分布。随机振动分析的输出为响应功率谱密度，与输入的随机功率谱密度具有同样的物理意义。

随机振动分析基于模态分析，是一种线性分析技术。任何非线性特性，如塑性和接触（间隙）单元，即使定义了也将被忽略。

本章主要介绍了随机振动分析的基本原理和分析步骤，给出了利用 HyperMesh 进行单点随机振动分析和多点随机振动分析前处理的实例，并解释了随机振动分析的结果。

12.1　随机振动分析的类型

ANSYS 的随机振动分析分为两种类型：单点随机振动分析和多点随机振动分析。单点随机振动分析是指在模型的一个点集（如在所有固定支撑处）定义相同的功率谱密度曲线；多点随机振动分析是指在模型的不同点集上定义不同的功率谱密度曲线，这与响应谱分析的类型相同，如图 11-1 所示。

12.2　随机过程的数字特征

对于随机过程，工程上常用的也是最基本的数字特征有均值（Mean）、方差（Variance）、标准方差（Standard Deviation）、均方（Mean Square）、均方根（Root Mean Square，RMS）。

（1）均值

均值即平均值，也称为数学期望。设 x_1，x_2，…，x_n 为随机变量，则均值 $\overline{x}$ 可表达为

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \tag{12-1}$$

（2）方差

方差 σ^2 表示对均值 $\bar{x}$ 的偏离程度，定义为

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n} \tag{12-2}$$

（3）标准方差

标准方差 σ 简称为标准差，为方差的算术平方根，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} \tag{12-3}$$

（4）均方

均方 ϕ^2 定义为随机变量的平方的平均值，即

$$\phi^2 = \frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n} \tag{12-4}$$

（5）均方根

均方根 ϕ 为均方的算术平方根，即

$$\phi = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} \tag{12-5}$$

（6）正态分布

在 ANSYS 中，假定随机振动输入、输出的均值为零，且满足正态（高斯）分布（见图 12-1），则方差等于均方，标准方差等于均方根。

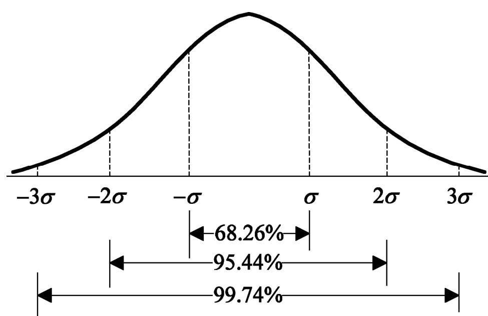


图 12-1　正态分布的概率密度函数

ANSYS 默认输出 1σ 的解为响应的标准方差，表示响应值小于 1 倍标准方差 σ 的概率为 68.26%。由图 12-1 可知，响应值小于两倍标准方差 2σ 的概率为 95.44%，小于 3 倍标准方差 3σ 的概率为 99.74%。我们看到，尽管正态变量的取值范围是 $(-\infty,\infty)$，但它的值落在 $(-3\sigma,3\sigma)$ 内几乎是肯定的事，这就是人们常说的“3σ”法则。

12.3　随机振动分析的基本步骤

STEP 1 建立有限元网格模型

根据实际问题的特点，对所分析的问题进行初步计划；建立反映真实物理情况的 CAD 模型或简化的 CAD 模型，并对其划分有限元网格；定义单元类型、单元选项、实常数、截面特性和材料特性。

在进行随机振动分析时，要注意如下内容：

1）只有线性行为是有效的，如果指定了非线性单元，它们将被当做是线性的。例如，如果分析中包含了接触单元，则系统取其初始状态的刚度值，并且不再改变此刚度值。

2）材料特性可以是线性的、各向同性的或正交各向异性的、恒定的或与温度相关的。非线性材料特性将被忽略。

3）必须指定杨氏模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量）。

STEP 2 获得模态解

结构的模态解，即固有频率和振型，是随机振动分析所必需的。模态分析的具体过程在第 8 章中已经阐述过，这里还须注意以下几点：

1）必须使用 Block Lanczos（默认）、PCG Lanczos 或 Supernode 方法提取模态，其他方法对下一步的随机振动分析是无效的。

2）所提取的模态数目应足以表征在感兴趣的频率范围内结构所具有的响应，模态频率范围应覆盖功率谱密度频率范围的 1.5 倍。

3）为了在随机振动分析中包含高阶模态的影响，用户可以在模态分析中计算残差向量（Residual Vector），然后在随机振动分析中使用残差向量。

4）为简化分析过程并提高分析精度，在模态分析中应扩展所有模态。

5）必须在施加激励谱的位置添加自由度约束。

6）求解结束后退出 SOLUTION 处理器。

STEP 3 设置求解控制选项

模态分析完成后，重新进入求解器，并定义分析类型为谱分析（ANTYPE,SPECTR），再通过 Spectrum Analysis 对话框来设置求解选项，如图 12-2 所示。图中定义了随机振动分析（PSD），并设置求解所需的模态数为 12。如果对单元和支反力结果感兴趣，则应开启计算单元应力（Calculate elem stresses）选项，且在之前的模态分析中，也应开启计算单元结果选项。

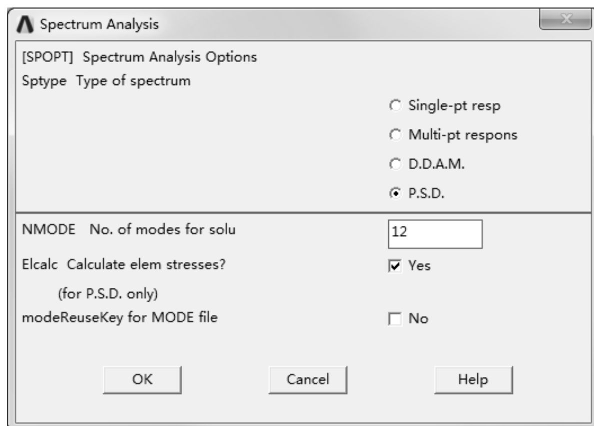


图 12-2 Spectrum Analysis 对话框

STEP 4 设置阻尼

与响应谱分析不同，随机振动有持续的能量输入。为避免结构响应趋于无限值，应指定

阻尼。可以指定下列形式的阻尼：ALPHA 阻尼、BETA 阻尼、恒定阻尼比和振型阻尼。若未指定阻尼，ANSYS 将采用 1%的恒定阻尼比。

STEP 5 施加载荷

功率谱密度的类型可以是位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度或压力功率谱密度。如果施加压力功率谱密度，则应在模态分析时就施加压力。除力功率谱密度和压力功率谱密度外，其余所有类型的功率谱密度都是地震谱，即假定它们都作用于结构的基础上。谱值-频率曲线既可通过 GUI 方式定义，也可通过命令流方式定义，详见第 12.4 节。

STEP 6 计算参与系数

参与系数代表每阶模态在特定方向上对变形（应力）的贡献，详见第 12.4 节。

STEP 7 处理多个 PSD 激励

如果同一模型上有多个 PSD 激励，则按每一个功率谱密度表重复步骤 12.3.4～12.3.6，然后根据实际情况确定各激励间的相关程度，详见第 12.5 节。

STEP 8 设置输出控制选项

随机振动分析只有一条输出控制命令 PSDRES，它指定写入结果文件的数量和格式。ANSYS 可以计算 3 种解：位移解、速度解或加速度解，每一种解都可以是绝对值或相对于基础的相对值。

STEP 9 合并模态

在随机振动分析中，只有 PSD 模态合并方法，该方法将计算结构中的 1σ位移和应力等。

STEP 10 求解

在执行求解命令之前，可将当前模型进行备份，以便将来恢复模型。

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

STEP 11 查看结果

随机振动分析的结果都写入结果文件 Jobname.rst，它包括如下信息：

1）模态分析结果中的扩展模态振型，为载荷步 1。

2）基础激励静力解，为载荷步 2。

基于结果输出设置和模态合并，可获得下列输出信息：

1）1σ 位移解（位移、应力、应变和力），为载荷步 3。

2）1σ 速度解（速度、应力速度、应变速度和力速度），为载荷步 4。

3）1σ 加速度解（加速度、应力加速度、应变加速度和力加速度），为载荷步 5。

正如第 12.3 节所述，1σ 为响应的标准方差，表示响应值小于 1 倍标准方差 σ 的概率为 68.26%。仅有位移、力、应力和应变的分量值是 1σ 值，并遵循高斯或正态分布。合成值或转换到其他坐标系中的分量值不具有统计学上的意义，应该避免这种情况。对于用户关心的 von

Mises 等效应力 SEQV，ANSYS 使用特殊的算法计算这个值，再将其乘以 3 倍，就得到3σ值，以得到一个很好的上限值。梁单元和管单元不能计算 SEQV 值。

可先在通用后处理器 POST1 中观察上述信息，然后利用时间历程后处理器 POST26 计算响应 PSD。

12.4　单点随机振动分析实例

板壳-梁结构如图 12-3 所示，计算结构在 *Y* 方向位移功率谱密度谱（见表 12-1）作用下的响应。已知条件如下：

1）板壳厚度为 0.005m。

2）梁截面为正方形，边长为 0.01m。

3）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 2.1×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

4）假定结构的恒定阻尼比为 0.02。

5）本例采用国际单位制。

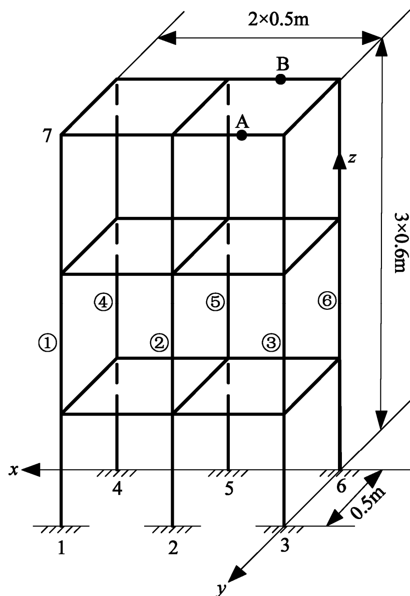


图 12-3　板壳-梁结构模型

表 12-1　位移功率谱密度谱

频率/Hz	0.5	1.0	2.4	3.8	17	18	20	32
PSD/（10^{-5}m^2/Hz）	1.0	2.0	1.6	2.0	0.5	1.0	1.5	1.0

STEP 1 建立有限元模型并完成模态分析

第 11.4 节建立了板壳-梁结构的有限元模型，并完成了模态分析，在此基础上继续进行单点随机振动分析。

STEP 2 随机振动分析求解控制

完成模态分析之后，必须借助 ANSYS 界面才能完成后续的随机振动分析。

1）退出后处理器，GUI 方式为 Main Menu→Finish。

2）定义新的分析类型为谱分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis。如图 12-4 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分类类型。

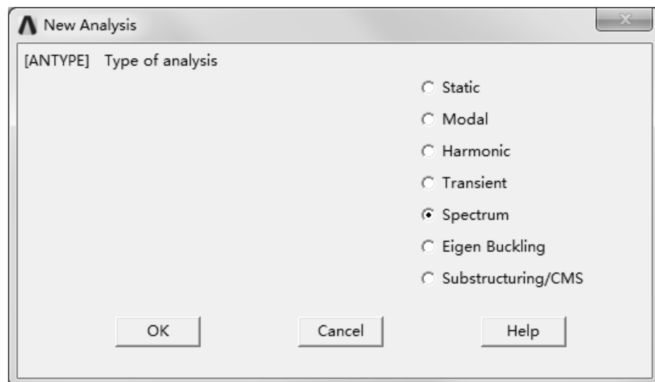


图 12-4 定义新的分析类型为 Spectrum

3）设置随机振动分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，选择 P.S.D，设置求解所需的模态数为 12，并开启计算单元应力选项，如图 12-5 所示。由模态分析可知，前 12 阶模态频率范围已覆盖功率谱密度频率范围的 1.5 倍。

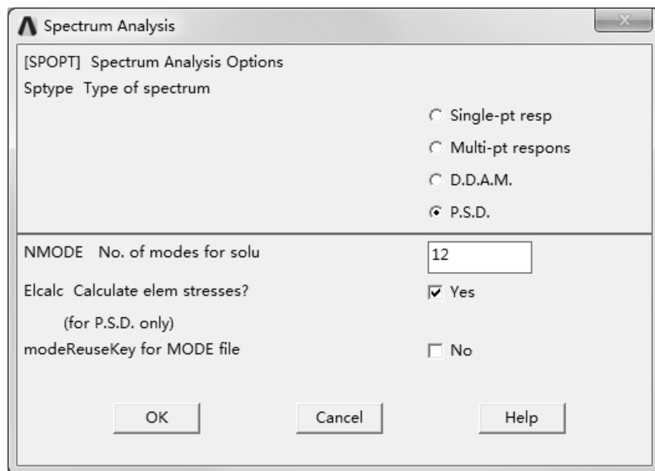


图 12-5 Spectrum Analysis 对话框

STEP 3 设置阻尼

对于随机振动分析，应指定某种形式的阻尼，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Damping。本例设置结构的恒定阻尼比为 DMPRAT=0.02，即 2%，如图 12-6 所示。

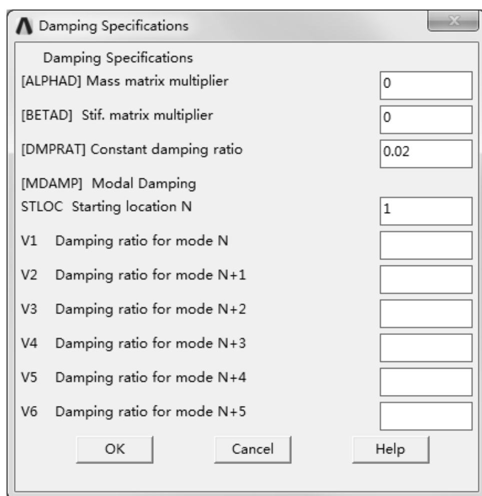


图 12-6　Damping Specifications 对话框

STEP 4 载荷定义

1）设置载荷步选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Settings。设置 PSD 的类型为 Displacement，即地震位移谱，作用于编号为 1、2、3 的节点，即 BASE1 节点集。PSD 谱的编号设为 1。激励方向由 Excitation direction in global Cartesian 指定，通过笛卡儿坐标定义一个方向矢量来关联激励方向，PSD 谱 1 作用于 *Y* 方向，故应设置 SEDX=0，SEDY=1，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 12-7 所示。

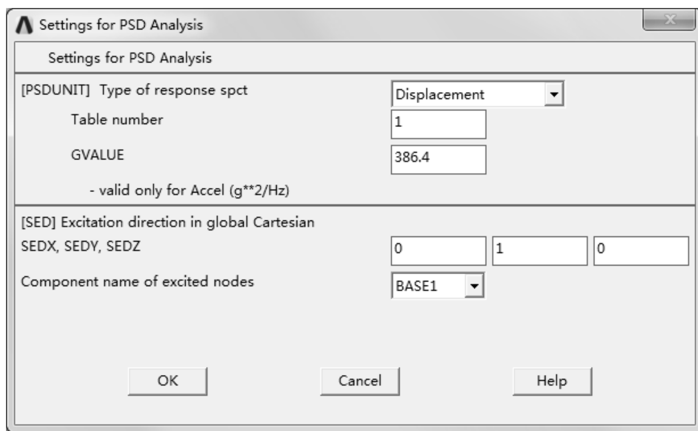


图 12-7　Settings for PSD Analysis 对话框

2）按同样的方法设置载荷步选项，将位移谱作用于编号为 4、5、6 的节点，即 BASE2 节点集。仅须将图 12-7 中的 BASE1 切换为 BASE2，如图 12-8 所示。于是，编号为 1 的 PSD 谱将作用到结构的 6 个固定支撑处。

3）设置 PSD-频率表，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→PSD vs Freq，弹出 Table for PSD vs Frequency 对话框（见图 12-9），保持默认设置，单击 OK 按钮，弹出 PSD vs Frequency Table。将表 12-1 中的频率和谱值输入对应的表格中，

如图 12-10 所示。

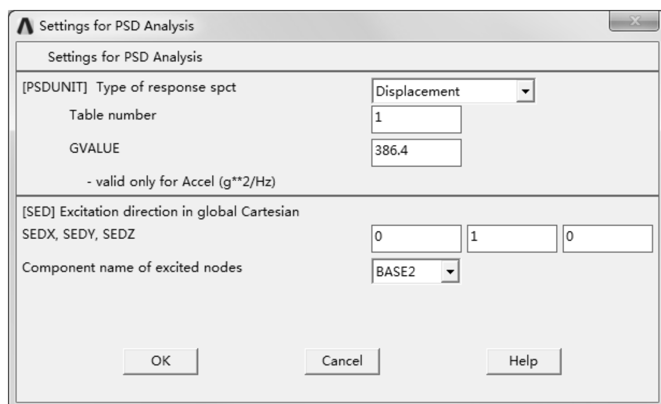


图 12-8　Settings for PSD Analysis 对话框

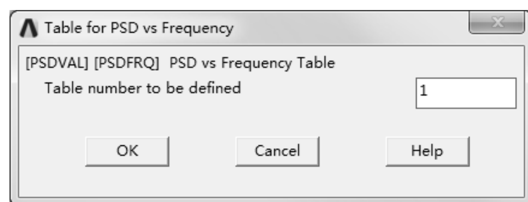


图 12-9　Table for PSD vs Frequency 对话框

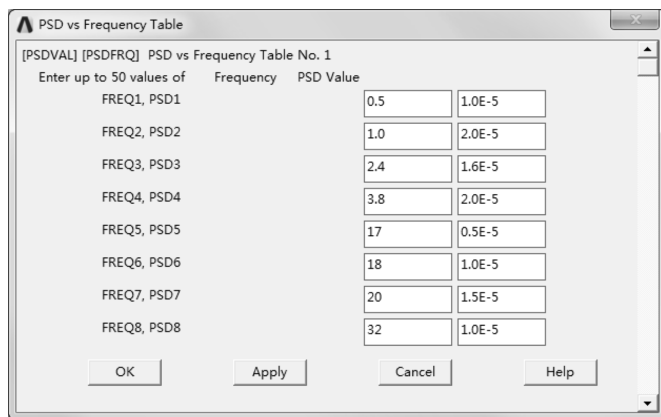


图 12-10　PSD vs Frequency Table 对话框

说明：对于随机振动分析，除 GUI 方式外，也可用命令流方式定义频率-谱值曲线，例如，可按如下命令流定义表 12-1 中的频率和谱值：

```
PSDFRQ,1,,0.5,1.0,2.4,3.8,17                    !定义频率
PSDFRQ,1,,18,20,32                              !定义频率
PSDVAL,1,1.0E-5,2.0E-5,1.6E-5,2.0E-5,0.5E-5     !定义谱值
PSDVAL,1,1.0E-5,1.5E-5,1.0E-5                   !定义谱值
```

STEP 5 计算参与系数

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Calculate PF，保持默认设置，如图 12-11 所示。单击 OK 按钮，ANSYS 将计算参与系数，可以在 ANSYS 的输出窗口中看到计算结果，如图 12-12 所示。

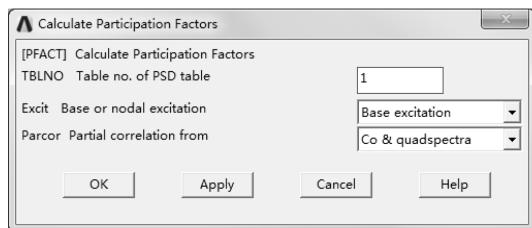


图 12-11 计算参与系数

```
***** PARTICIPATION FACTORS FOR BASE EXCITATION NO.   1 *****    TABLE NO.  1

MODE    VALUE       MODE    VALUE       MODE    VALUE       MODE    VALUE

   1 -0.21708E-07    2   -7.5938         3 -0.41870E-08    4  0.10361E-08
   5  -2.6248        6 -0.30039E-10      7  0.56869E-09    8  -1.2979
   9 -0.26478E-10   10  0.40080E-09     11  0.46219E-09   12 -0.11606E-08
```

图 12-12 参与系数

STEP 6 设置输出控制选项

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Calc Controls，弹出 PSD Calculation Controls 对话框，依次将 Displacement solution、Velocity solution、Acceleration solution 设置为 Absolute，如图 12-13 所示。

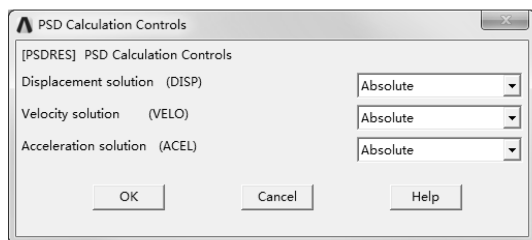


图 12-13 PSD Calculation Controls 对话框

STEP 7 合并模态

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Mode Combine，设置阈值为 0.0001，模态阶数为 12，如图 12-14 所示。

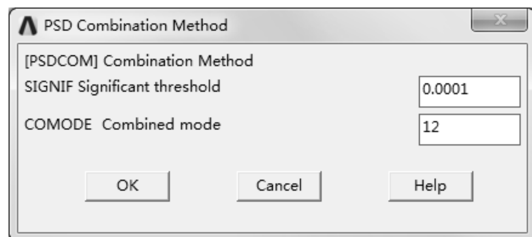


图 12-14 PSD Combination Method 对话框

STEP 8 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

1）进入通用后处理器 POST1，读取载荷步 3（σ）的结果，查看板壳-梁结构的位移云图和应力云图，如图 12-15 和图 12-16 所示。

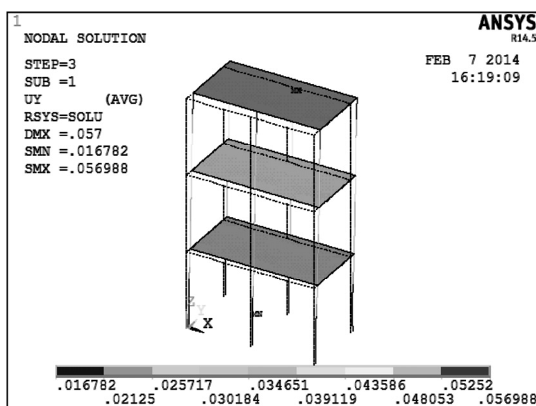


图 12-15　板壳-梁结构 *Y* 方向的位移云图

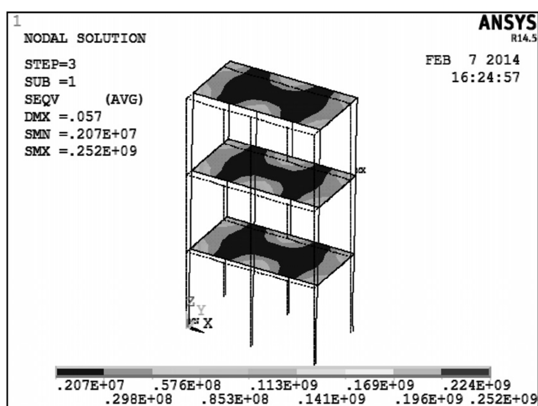


图 12-16　板壳-梁结构的 von Mises 应力云图

由图 12-15 和图 12-16 可知，在 PSD 谱的作用下，板壳-梁结构 *Y* 方向的最大位移为 57mm，位于最上层板面，最大 von Mises 应力为 252MPa，位于板壳的角点。

值得注意的是，对于随机振动分析，仅有位移、力、应力和应变的分量值是 σ 值，并遵循高斯或正态分布。合成值或转换到其他坐标系中的分量值不具有统计学上的意义，应该避免这种情况。对于用户关心的 von Mises 等效应力 SEQV，ANSYS 使用特殊的算法计算这个值，但梁单元不能计算 SEQV 值，所以，图 12-16 中未包含梁的应力。

2）进入时间历程后处理器 POST26，弹出 Spectrum Usage 对话框，选择 Create response power spectral density （PSD）单选按钮，如图 12-17 所示。

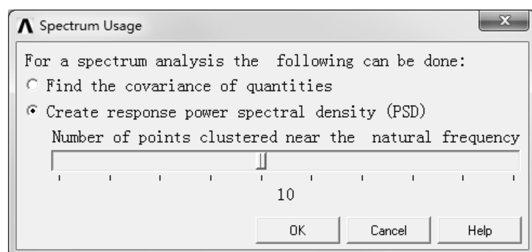


图 12-17　Spectrum Usage 对话框

3）存储频率向量，GUI 方式为 Main Menu→TimeHistPostpro→Store Data，保持默认设置，

如图 12-18 所示。NPTS 介于 1～10 之间，数值越大，绘制的曲线越光滑。

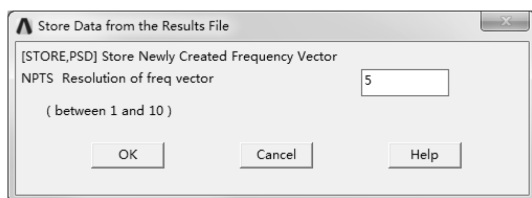


图 12-18　Store Data from the Results File 对话框

4）定义变量，GUI 方式为 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables，选取图 12-3 中编号为 7 的节点，读取 *Y* 方向变形，定义变量号为 2。

5）计算位移 PSD 响应谱，GUI 方式为 Main Menu→TimeHistPostpro→Calc Resp PSD，弹出 Calculate Response PSD 对话框，设置结果变量号为 3，被操作的变量号为 2，响应 PSD 谱为 Displacement，并指定为绝对值（Absolute value），如图 12-19 所示。

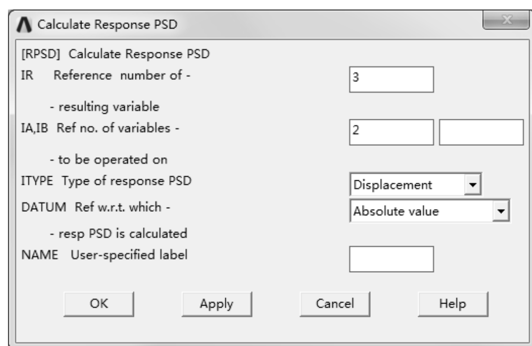


图 12-19　Calculate Response PSD 对话框 1

6）计算速度 PSD 响应谱，GUI 方式为 Main Menu→TimeHistPostpro→Calc Resp PSD，弹出 Calculate Response PSD 对话框，设置结果变量号为 4，被操作的变量号为 2，响应 PSD 谱为 Velocity，并指定为绝对值（Absolute value），如图 12-20 所示。

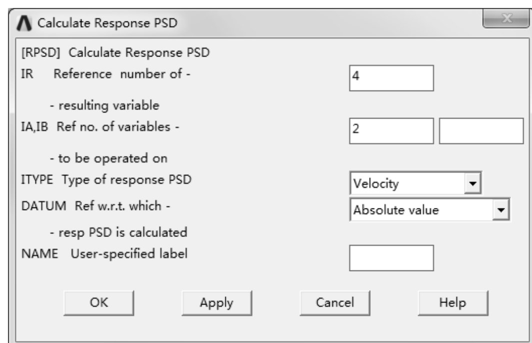


图 12-20　Calculate Response PSD 对话框 2

7）计算加速度 PSD 响应谱，GUI 方式为 Main Menu→TimeHistPostpro→Calc Resp PSD，

弹出 Calculate Response PSD 对话框，设置结果变量号为 5，被操作的变量号为 2，响应 PSD 谱为 Acceleration，并指定为绝对值（Absolute value），如图 12-21 所示。

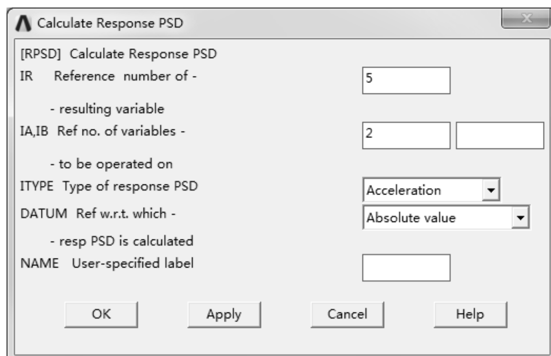


图 12-21　Calculate Response PSD 对话框 3

8）绘制 PSD 响应谱曲线，如图 12-22～图 12-24 所示。

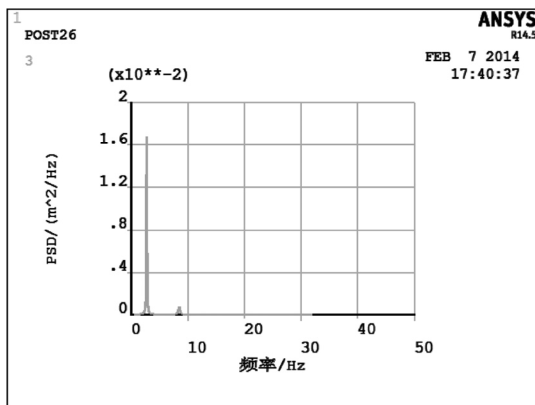


图 12-22　位移 PSD 响应谱曲线

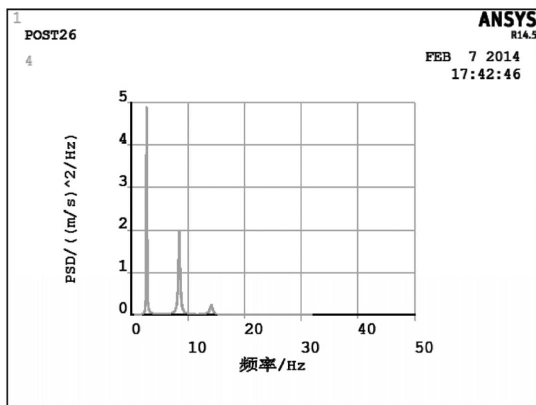


图 12-23　速度 PSD 响应谱曲线

将 PSD 响应谱曲线对频率积分，便得方差，即标准方差（σ）的平方。

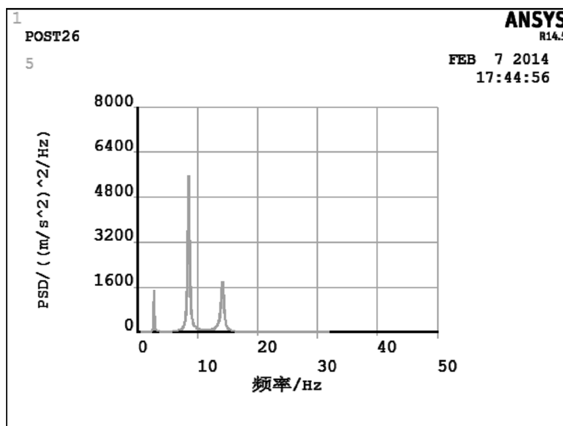


图 12-24　加速度 PSD 响应谱曲线

由图 12-22～图 12-24 可知，在 2.7205Hz（第 2 阶模态）、8.4891Hz（第 5 阶模态）、14.161Hz（第 8 阶模态）频率附近，结构容易产生较大的振动，这是因为结构的第 2 阶、第 5 阶、第 8 阶模态振型正好为 *Y* 方向的振动。

12.5 多点随机振动分析实例

板壳-梁结构如图 12-25 所示，编号为 1、2、3 的节点受到 *Y* 方向的位移功率谱密度谱（见表 12-2）作用，编号为 4、5、6 的节点受到 *X* 方向的位移功率谱密度谱（见表 12-2）作用，假设两个方向的 PSD 谱不相关，计算结构在多点 PSD 谱作用下的响应。已知条件如下：

1）板壳厚度为 0.005m。

2）梁截面为正方形，边长为 0.01m。

3）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 2.1×10^{11}Pa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

4）假定结构的恒定阻尼比为 0.02。

5）本例采用国际单位制。

表 12-2 位移功率谱密度谱

频率/Hz	0.5	1.0	2.4	3.8	17	18	20	32
PSD/（10^{-5}m^2/Hz）	1.0	2.0	1.6	2.0	0.5	1.0	1.5	1.0

STEP 1 定义载荷 1

多点随机振动分析过程与单点随机振动分析过程基本相同。在完成第 12.4 节的第 1 步～第 3 步之后，定义载荷 1。载荷 1 为施加于 BASE1 节点集（不含 BASE2 节点集）的 *Y* 方向的位移 PSD 谱。

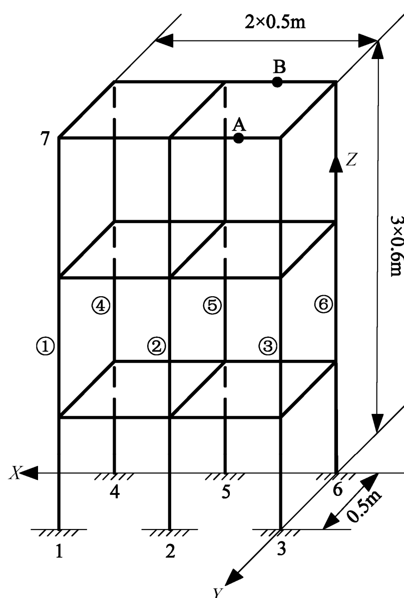


图 12-25 板壳-梁结构模型

1）设置载荷步选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Settings。设置 PSD 的类型为 Displacement，即地震位移谱，作用于编号为 1、2、3 的节点，即 BASE1 节点集。PSD 谱的编号设为 1。激励方向由 Excitation direction in global Cartesian 指定，通过笛卡儿坐标定义一个方向矢量来关联激励方向，PSD 谱 1 作用于 *Y* 方向，故应设置 SEDX=0，SEDY=1，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 12-26 所示。

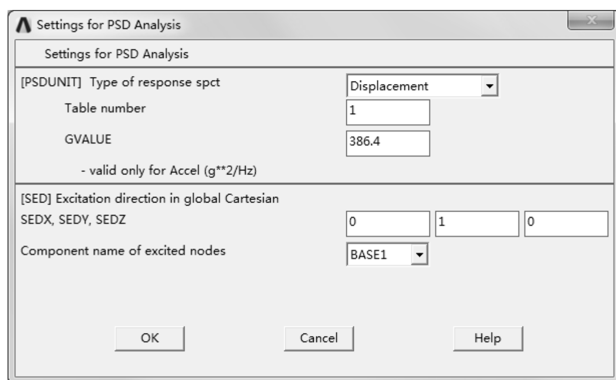


图 12-26　Settings for PSD Analysis 对话框

2）设置 PSD-频率表，对于多点随机振动分析，谱值-频率曲线既可通过 GUI 方式定义，也可通过命令流方式定义。本例可按如下命令流定义表 12-2 中的频率和谱值：

```
PSDFRQ,1,,0.5,1.0,2.4,3.8,17                  !定义频率
PSDFRQ,1,,18,20,32                            !定义频率
PSDVAL,1,1.0E-5,2.0E-5,1.6E-5,2.0E-5,0.5E-5   !定义谱值
PSDVAL,1,1.0E-5,1.5E-5,1.0E-5                 !定义谱值
```

STEP 2 计算参与系数 1

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Calculate PF，保持默认设置，如图 12-27 所示。单击 OK 按钮，ANSYS 将计算参与系数 1，可以在 ANSYS 的输出窗口中看到计算结果，如图 12-28 所示。

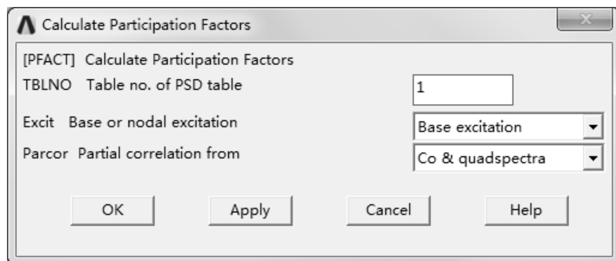


图 12-27　计算参与系数 1

```
***** PARTICIPATION FACTORS FOR BASE EXCITATION NO.   1 *****    TABLE NO.  1

MODE   VALUE       MODE   VALUE       MODE   VALUE       MODE   VALUE

  1 -0.11406E-07    2   -3.7969        3 -0.84877E-09    4  0.55108E-09
  5  -1.3124        6  0.70592E-10     7  0.28879E-09    8 -0.64893
  9 -0.47335E-11   10  0.46733E-01    11  0.17679E-09   12 -0.97668E-01
```

图 12-28　参与系数 1

STEP 3 定义载荷 2

载荷 2 为施加于 BASE2 节点集（不含 BASE1 节点集）的 *X* 方向的位移 PSD 谱。

1）首先应删除施加到 BASE1 节点集的载荷，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Settings，设置 PSD 的类型为 Displacement，作用于 BASE1 节点集。PSD 谱的编号设为 2。设置 SEDX=0，SEDY=0，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 12-29 所示。单击 OK 按钮，即将 BASE1 节点集的载荷删除。

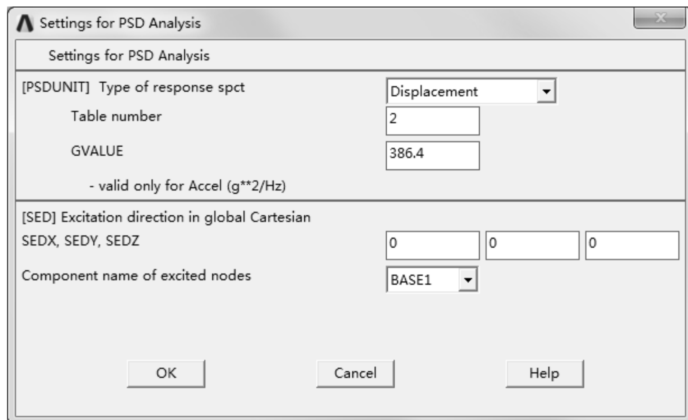


图 12-29 Settings for PSD Analysis 对话框

2）设置 BASE2 节点集的载荷，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Settings。设置 PSD 的类型为 Displacement，作用于编号为 4、5、6 的节点，即 BASE2 节点集。PSD 谱的编号设为 2。PSD 谱 2 作用于 *X* 方向，故应设置 SEDX=1，SEDY=0，SEDZ=0。其余选项保持默认值，如图 12-30 所示。

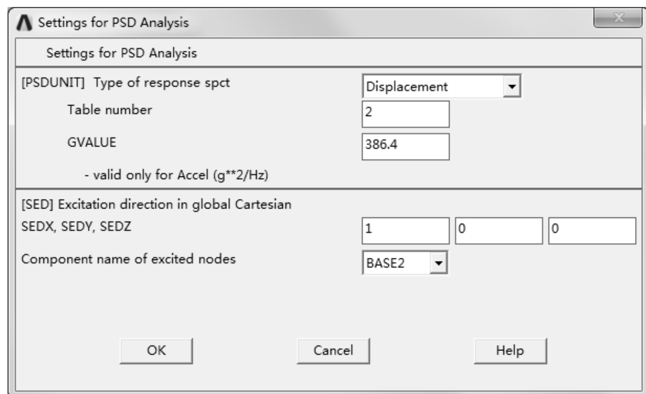


图 12-30 Settings for PSD Analysis 对话框

3）按如下命令流定义表 12-2 中的频率和谱值：

```
PSDFRQ,2,,0.5,1.0,2.4,3.8,17                     !定义频率
PSDFRQ,2,,18,20,32                               !定义频率
PSDVAL,2,1.0E-5,2.0E-5,1.6E-5,2.0E-5,0.5E-5      !定义谱值
PSDVAL,2,1.0E-5,1.5E-5,1.0E-5                    !定义谱值
```

STEP 4 计算参与系数 2

GUI 方式为 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Calculate PF，设置表格号为 2，如图 12-31 所示。单击 OK 按钮，ANSYS 将计算参与系数 2，可以在 ANSYS 的输出窗口中看到计算结果，如图 12-32 所示。

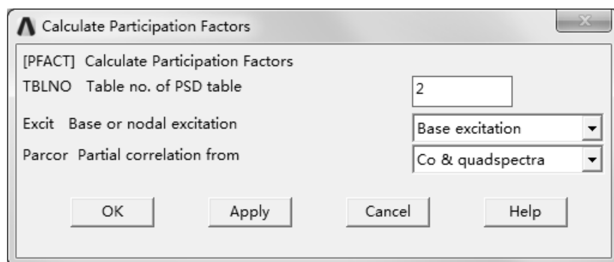


图 12-31 计算参与系数 2

```
***** PARTICIPATION FACTORS FOR BASE EXCITATION NO.   2 *****    TABLE NO.  2

MODE   VALUE      MODE   VALUE      MODE   VALUE       MODE   VALUE

  1  -3.7911        2  0.11809E-07    3  -1.2908         4   1.3222
  5  0.55452E-09    6 -0.46368        7  0.66191         8  0.26962E-09
  9 -0.24038       10  0.63034E-10   11 -0.15726E-01    12  0.14954E-09
```

图 12-32 参与系数 2

STEP 5 后续求解及查看结果

多点随机振动分析的输出控制、合并模态、求解与单点随机振动分析相同，详见第 12.4 节。

1）进入通用后处理器 POST1，读取载荷步 3（σ）的结果，查看板壳-梁结构的位移云图和应力云图，如图 12-33～图 12-35 所示。

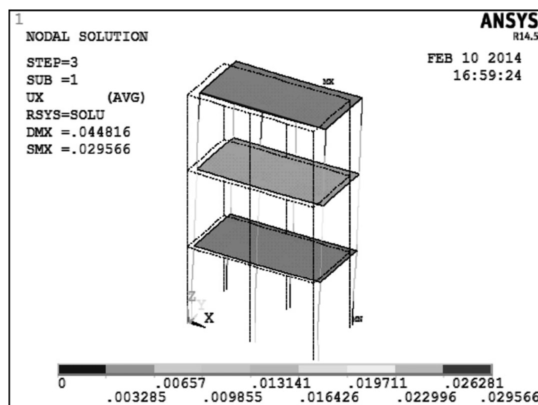


图 12-33 板壳-梁结构 *X* 方向的位移云图

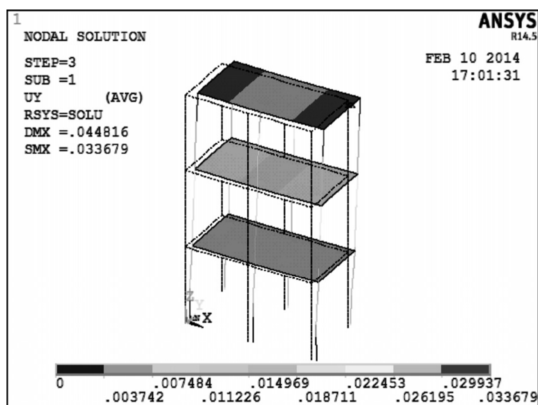


图 12-34 板壳-梁结构 *Y* 方向的位移云图

由图 12-33～图 12-35 可知，在多点 PSD 谱的作用下，板壳-梁结构 *X* 方向的最大位移为 29.566mm，*Y* 方向的最大位移为 33.679mm，均位于最上层板面，最大 von Mises 应力为 191MPa，位于板壳的角点。

值得注意的是，对于随机振动分析，仅有位移、力、应力和应变的分量值是σ值，并遵循高斯或正态分布。合成值或转换到其他坐标系中的分量值不具有统计学上的意义，应该避免这种情况。对于用户关心的 von Mises 等效应力 SEQV，ANSYS 使用特殊的算法计算这个值，但梁单元不能计算 SEQV 值，所以图 12-35 中未包含梁的应力。

2）进入时间历程后处理器 POST26，读取图 12-25 中编号为 7 的节点的 X 和 Y 方向变形，并计算 PSD 响应谱，绘制 PSD 响应谱曲线，如图 12-36～图 12-38 所示。

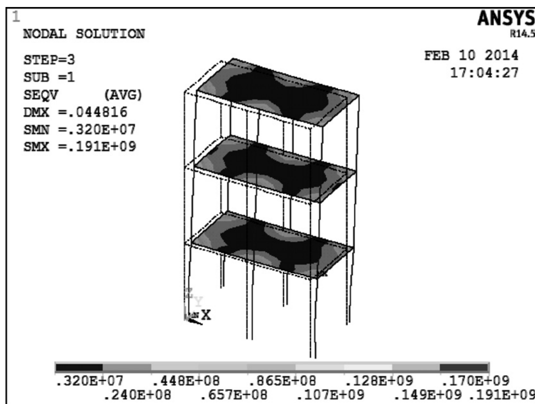


图 12-35 板壳-梁结构的 von Mises 应力云图

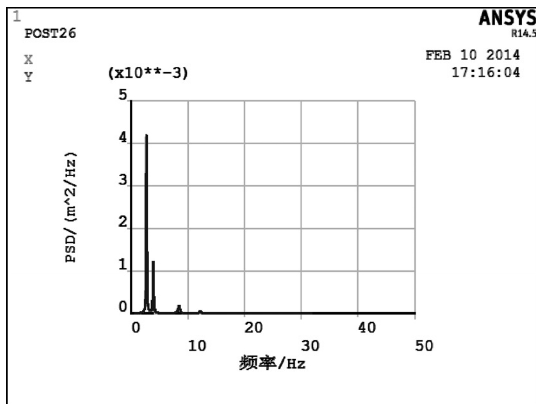


图 12-36 位移 PSD 响应谱曲线

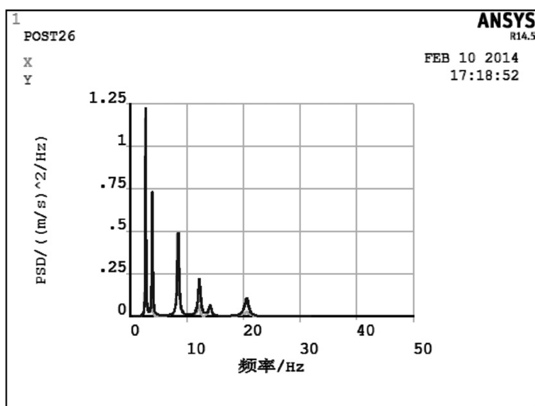


图 12-37 速度 PSD 响应谱曲线

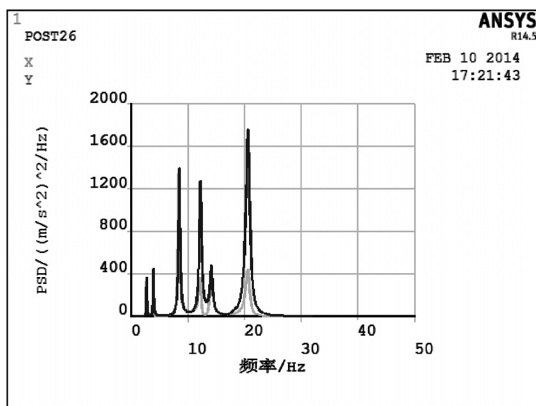


图 12-38 加速度 PSD 响应谱曲线

将 PSD 响应谱曲线对频率积分，便得方差，即标准方差（σ）的平方。

由图 12-36～图 12-38 可知，对于多点随机振动激励，由于激励方向不同，结构振动较复杂，在多个模态频率点附近容易产生较大的振动。

12.6 本章小结

1）本章基于 ANSYS，介绍了随机振动分析的基本原理和分析步骤，有助于理解 HyperMesh 的建模过程。

2）本章的两个实例源于 ANSYS 教程。在随机振动分析之前，必须首先进行模态分析。可利用 HyperMesh 建立有限元模型，并完成模态分析设置，后续的随机振动分析则必须借助 ANSYS 界面才能完成。

3）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

4）随机振动分析用于确定结构在随机载荷作用下的响应。与确定性振动不同，随机振动服从概率统计规律，只能用概率统计方法描述，我们只能知道物理量的统计值，如均值、均方根值、标准方差等。

5）在后处理中，值得注意的是，仅有位移、力、应力和应变的分量值是σ值，并遵循高斯或正态分布。合成值或转换到其他坐标系中的分量值不具有统计学上的意义，应该避免这种情况。对于用户关心的 von Mises 等效应力 SEQV，ANSYS 使用特殊的算法计算这个值，再将其乘以 3 倍，就得到3σ值，以得到一个很好的上限值。梁单元和管单元不能计算 SEQV 值。

第 13 章　几何非线性分析

尽管线性有限元分析在工程问题的处理中得到了广泛应用，但对于实际工程问题，几乎不存在具有理想线性行为的结构[19]。为了对实际工程问题进行更精确的仿真分析，必须引入非线性有限元分析。

依据有限元方程和边界条件的具体特点，非线性有限元问题一般可分为 3 类：几何非线性、材料非线性和边界非线性。对于实际工程问题，可能遇到 3 类非线性问题中的一种或多种。

本章主要介绍了几何非线性所涉及的问题及处理方法，给出了利用 HyperMesh 进行几何非线性分析前处理的实例，并解释了几何非线性分析的结果。

13.1　几何非线性涉及的问题及处理方法

13.1.1　小应变大位移（或大转动）

此类问题的特点是结构在载荷作用过程中产生了大的位移或转动（保持很小的应变），例如板壳结构的大挠度问题。此时，结构的平衡方程必须建立于变形后的状态，以便考虑变形对平衡的影响。同时，由于实际发生的大位移、大转动，几何方程也不能简化为线性形式，即应变表达式中必须包含位移的二次项。这样，平衡方程和几何方程都将是非线性的。图 13-1 为大转动小应变示例。

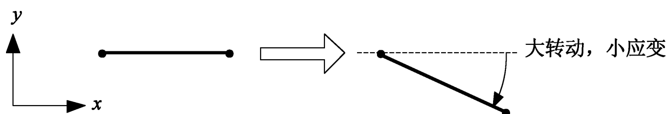


图 13-1　大转动小应变示例

13.1.2　大应变（包含大位移或大转动）

工程实际中还有另一类几何非线性问题，例如橡胶材料受载荷作用时可能产生很大的应变，通常还包含大位移或大转动。对于这类问题，除了采用非线性的平衡方程和几何方程外，还须引入相应的应力-应变关系，即考虑真实的应力-应变关系。图 13-2 为大应变示例。

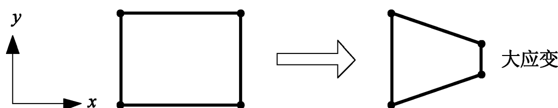


图 13-2　大应变示例

13.1.3 应力刚化效应

结构的面外刚度可能极大地受结构面内应力状态的影响。面内应力和横向刚度之间的耦合，通称为应力刚化。在细薄、高应力的结构中，如缆索或薄膜，应力刚化是最明显的。一个鼓面、一根钢丝，当它们绷紧时会产生垂向刚度，这是应力刚化常见的例子。

13.1.4 载荷和位移方向

在许多情况下，无论结构如何变形，施加在系统中的载荷都保持恒定的方向。而在另一些情况下，载荷将随着单元方向的改变而变化。

ANSYS 根据所施加的载荷类型，可以模拟这两种情况。加速度和集中力将不管单元方向的改变，而保持它们最初的方向。压强载荷作用在变形单元表面的法向，且可被用来模拟“跟随”力。图 13-3 表示了方向不变的力和跟随力。

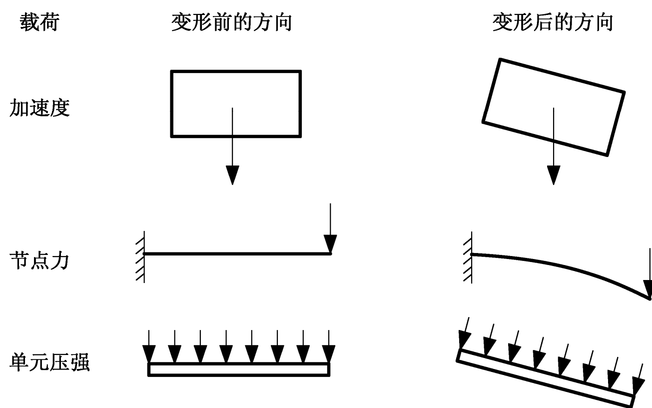


图 13-3　变形前后的载荷方向

值得注意的是，在大变形分析中，节点坐标系始终保持初始方向不变，因此计算出的位移在最初的方向上输出。

13.1.5 有限元网格模型的特殊要求

在大应变、大变形或大转动的求解过程中，每一步都会用计算出的位移更新节点坐标。新的网格将作为下一步计算的起始点，如果网格严重扭曲，这一步的求解精度将成为问题，这类似于用已扭曲的网格完成一次线性分析。因此，为了考虑后续的网格变形，应控制初始网格质量，尽量不使用带有中间节点的单元，即高阶单元。对于非线性分析，高阶单元仅使用角节点的积分点，其计算精度与低阶单元相同，且这种单元更易受网格扭曲的影响。图 13-4 为不同初始网格变形前后的对比。

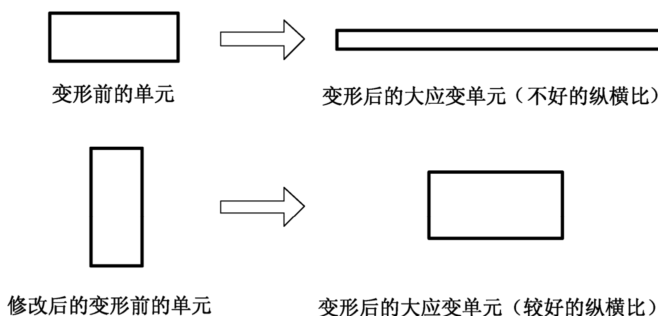


图 13-4 不同初始网格变形前后的对比

13.1.6 几何非线性求解控制

ANSYS 基于问题的物理特性，将各种非线性分析参数自动设置为合适的值。为包含几何非线性效应，只需在求解选项中开启大变形效应（NLGEOM,ON）。对于大多数单元，大变形效应也包含了应力刚化效应。

13.1.7 监视求解过程

在非线性分析求解过程中，ANSYS 在每个平衡迭代期间根据收敛准则计算收敛范数。ANSYS 将连续进行平衡迭代直到满足收敛准则，或者达到允许的平衡迭代的最大次数。

ANSYS 的自动求解控制应用 0.5%的力（或力矩）的 L2 范数（平方和的平方根，SRSS）容限，这对于大部分情况是合适的。在大多数情况下，除进行力范数的检查外，还进行 5%的位移 L2 范数的检查，图 13-5 为图形化的收敛过程。

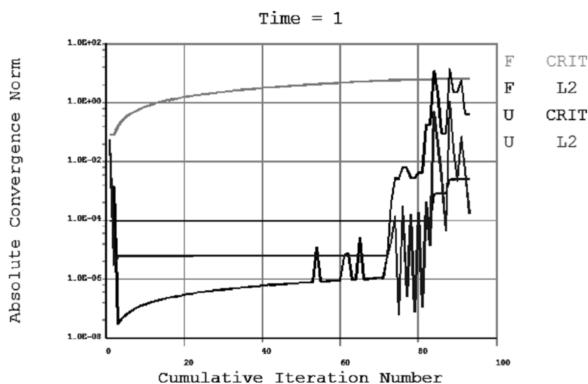


图 13-5 图形化的收敛过程

图 13-5 中，F CRIT 和 U CRIT 分别为力和位移的收敛准则；F L2 和 U L2 分别为力和位移的 L2 范数。当 L2 范数位于 CRIT 曲线下方时，则满足收敛准则。

13.2 几何非线性分析实例

图 13-6 为环形薄板的力学模型[20]。环形薄板内边缘固定约束，外边缘自由，环面承受均

布压强 q=0.2MPa，求解薄板外边缘大挠度变形，并与小变形理论对比。已知条件如下：

1）薄板内半径 b=10mm。

2）薄板外半径 a=20mm。

3）薄板厚度 h=0.3mm。

4）薄板材料为钢，其特性：杨氏模量为 206GPa，泊松比为 0.3。

5）图 13-6 中，r 为薄板径向，w 为薄板挠度。

6）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

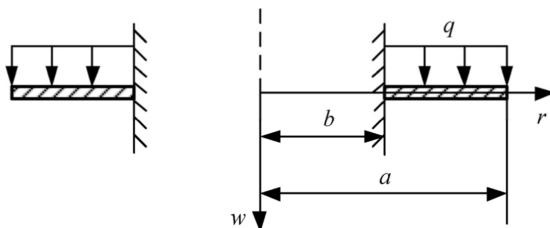


图 13-6　环形薄板的力学模型

STEP 1 网格划分

本例的几何模型较简单，可直接利用 HyperMesh 建立 1/4 圆环模型，再划分网格。

1）灵活利用 Geom 页面中的 nodes、lines 和 surfaces 面板，建立 1/4 圆环模型，并放置于 Geometry 组件集，如图 13-7 所示。

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将 1/4 圆环沿径向离散为 10 个单元，周向离散为 40 个单元，并放置于 Shell 组件集，如图 13-8 所示。需要注意的是，为了更好地模拟曲线边界，并提高计算精度，在划分单元时，应选用高阶单元选项 second order。

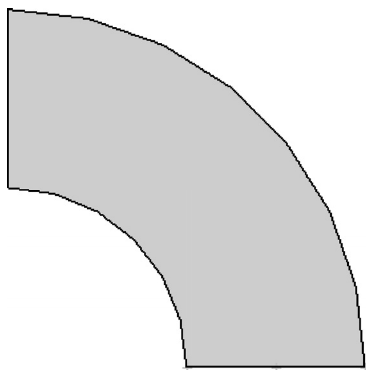


图 13-7　环形薄板的几何模型

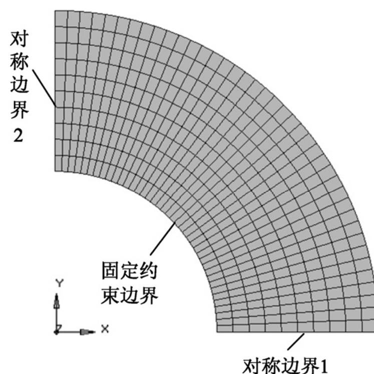


图 13-8　环形薄板的网格模型（10×40）

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。环形薄板选用高阶板壳单元 SHELL281，并保持默认单元选项。

STEP 3 定义板壳截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Plate，Section type

改为 SHELL，如图 13-9 所示。单击 Create/Edit 按钮，弹出板壳横截面设置卡片。设置 PLIES=1，表示单层板壳。设置 TK=0.3，定义板壳的厚度为 0.3mm。设置 NUMPT（1）=3，定义沿板壳厚度方向的积分点个数为 3，这是 ANSYS 的默认值，如图 13-10 所示。最后单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

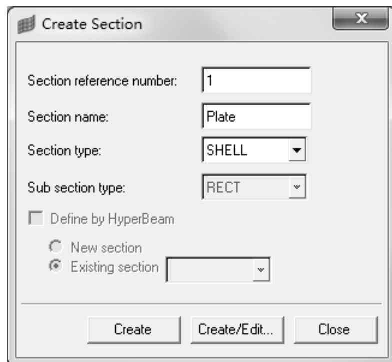


图 13-9　Create Section 对话框

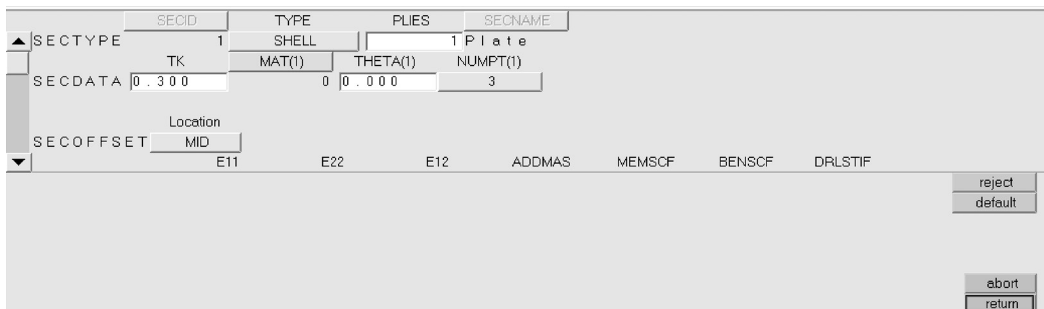


图 13-10　板壳横截面设置卡片

3）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

4）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 4 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为环形薄板定义材料，杨氏模量 EX 为 2.06E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3。

STEP 5 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Shell 组件集赋予单元、横截面和材料。

STEP 6 边界条件定义

1）利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 13-8 中固定约束边界的所有节点的 6 个自由度，并将约束载荷放置于 constraints_fixed 载荷集。

2）对于图 13-8 所示的对称边界 1，约束所有节点的 UY、ROTX、ROTZ 自由度，即勾选 dof2、dof4、dof6，并将约束载荷放置于 symmetry1 载荷集。

3）对于图 13-8 所示的对称边界 2，约束所有节点的 UX、ROTY、ROTZ 自由度，即勾

选 dof1、dof5、dof6，并将约束载荷放置于 symmetry2 载荷集。

STEP 7 载荷定义

利用 Analysis 页面中的 pressures 面板，对所有单元施加大小为 0.2MPa 的压力载荷，并将载荷放置于 pressure 载荷集。压力方向通过指定表面节点的顺序确定(右手法则)，如图 13-11 所示。

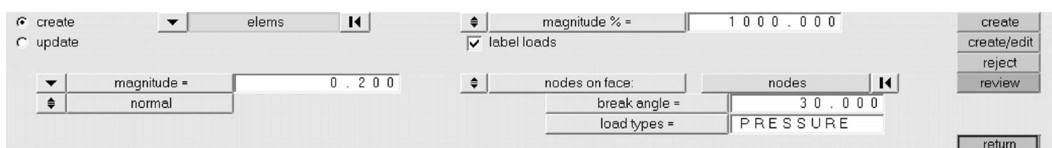


图 13-11　施加压力载荷

STEP 8 求解控制

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 13-12），STATIC 表示进行静力分析。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 13-13），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 TIME 按钮，将 time 设置为 50（见图 13-14），表示设置求解结束时间为 50s。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

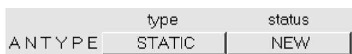


图 13-12　ANTYPE 命令



图 13-13　NLGEOM 命令

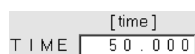


图 13-14　TIME 命令

6）单击 AUTOTS 按钮，保持默认设置（见图 13-15），表示关闭时间步长控制。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

7）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 50，其余选项保持默认设置（见图 13-16），表示设置载荷子步为 50。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 13-15　AUTOTS 命令

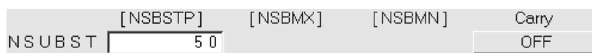


图 13-16　NSUBST 命令

8）单击 OUTRES 按钮，将 FREQ 设置为 ALL（见图 13-17），表示将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 13-17　OUTRES 命令

9）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并

单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

10）当前的控制卡片如图 13-18 和图 13-19 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 13-18　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 13-19　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 8 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
NLGEOM,ON
TIME,50
AUTOTS,OFF
NSUBST,50
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
```

STEP 9 求解并查看结果

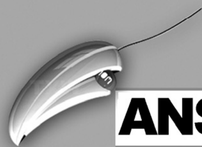
利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Annular_plate_static.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Annular_plate_static.cdb 文件，并自动进行几何非线性分析。

1）进入通用后处理器 POST1，读入 SET 50 的结果，查看环形薄板的位移云图，如图 13-20 所示。

由图 13-20 可知，环形薄板外边缘挠度为 0.419 847mm。

2）进入时间历程后处理器 POST26，读取环形薄板外边缘挠度-时间数据，并绘制曲线，如图 13-21 所示。为了与小挠度理论对比，图 13-21 中也包含了薄板小挠度变形数据。

由图 13-21 可知，当环形薄板挠度变形量较小时，小挠度解与大挠度解非常接近；随着薄板挠度变形的增大，小挠度解相对大挠度解的偏差不断增大（最大偏差为 28.7%）。其原因在于：随着薄板挠度的增大，薄板中面内各点产生的纵向位移已不能略去，小挠度理论的假设已不成立[21]，此时必须采用大挠度理论才能准确求得真实的薄板挠度变形。由此可见，大挠度理论不仅适用于薄板大挠度变形，也同样适用于小挠度变形。



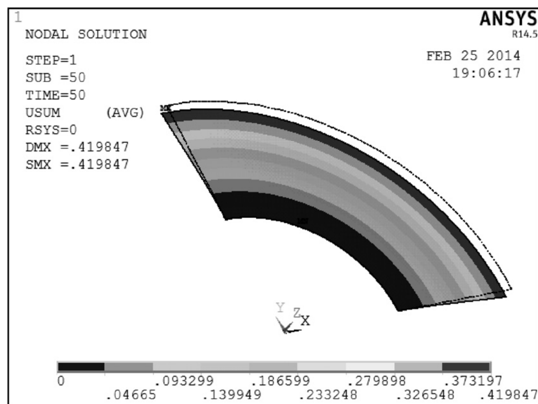


图 13-20　环形薄板的位移云图

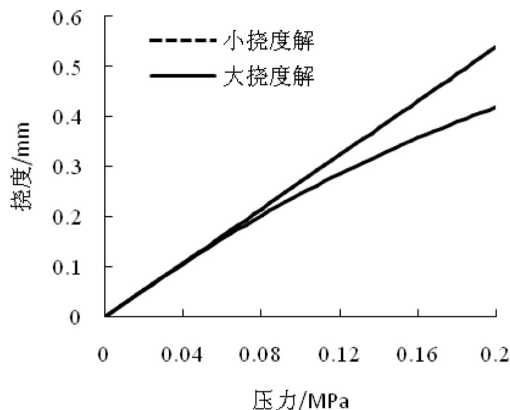


图 13-21　大挠度与小挠度理论挠度值对比曲线

13.3　本章小结

1）本章的实例源于一个经典的薄板挠曲变形问题。实例采用 HyperMesh 建立了有限元模型，并设置了所有的非线性求解选项。基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

2）几何非线性涉及大应变、大位移、大转动、应力刚化等问题，求解过程中必须开启大变形效应，采用缓慢加载可增强收敛性。

3）考虑几何非线性的分析更加符合工程实际，相比线性分析技术，其计算精度更高，但建模难度较大，且须消耗更多计算资源，通常还须克服计算不收敛的困难。



第 14 章 材料非线性分析

材料非线性是指本构方程中的应力和应变呈非线性关系。许多因素可以影响材料的应力-应变性质。非线性弹性、塑性、超弹性材料的非线性应力-应变关系，可以使结构刚度在不同载荷水平下以及在不同温度下发生变化。蠕变、粘塑性和粘弹性可以引起与时间、率、温度和应力相关的非线性。

ANSYS 可以包含上述任何材料非线性。本书只介绍弹塑性和超弹性材料非线性，这两种非线性材料的实例分别是金属和橡胶。

本章主要介绍了材料非线性所涉及的问题及处理方法，给出了利用 HyperMesh 进行弹塑性材料非线性分析和超弹性材料非线性分析前处理的实例，并分别解释了分析结果。

14.1 弹塑性涉及的问题及处理方法

14.1.1 弹塑性

许多常用的工程材料，在应力水平低于比例极限时，应力-应变呈线性关系。超过比例极限后，应力-应变呈非线性关系，但不一定是非弹性的。以不可恢复的应变为特征的塑性，则在应力超过屈服极限后开始出现。由于屈服极限与比例极限相差很小，ANSYS 在弹塑性分析中，假设这两个点相同。图 14-1 为弹塑性应力-应变曲线。

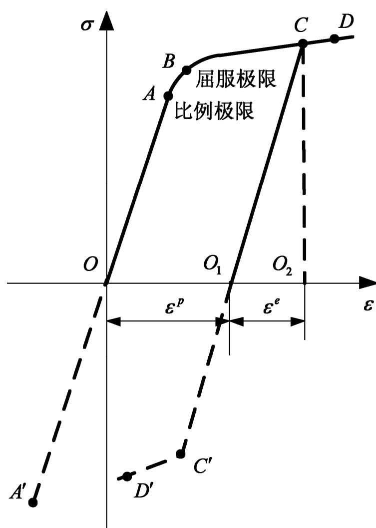


图 14-1 弹塑性应力-应变曲线

图 14-1 中，ε 为应变；σ 为应力；ε^p 为塑性应变，ε^e 为弹性应变，总应变为两者之和。

卸载服从弹性规律，斜率与初始加载相同，如 $OABCO_1$ 为一个加载–卸载历程。重复加载时，应力–应变沿曲线 O_1CD 上升。由于之前产生了塑性变形，将屈服极限由 B 点提高到 C 点，这种现象称为应变强化或应变硬化[22]。

塑性是一种非保守的（不可逆的）、与路径相关的现象。换句话说，荷载施加的顺序，以及什么时候发生塑性响应，影响最终的求解结果。

如果预计分析中会出现塑性响应，则应把荷载处理成一系列的小增量荷载步或时间步，以使模型尽可能符合荷载–响应路径。

14.1.2 Bauschinger 效应

对于大多数金属材料，如果卸载后进行反向加载（拉伸改为压缩），首先出现压缩的弹性变形，随后产生塑性变形（曲线 $O_1C'D'$），但这时的压缩屈服应力（点 C'）一般要低于一开始就反向加载的屈服应力（点 A'）。这种由于拉伸时强化影响到压缩时弱化的现象称为 Bauschinger 效应。

14.1.3 静水压力

静水压力是均匀作用于物体表面的压力。许多金属材料的实验结果表明，当静水压力不太大时，材料体积的变化服从弹性规律而不产生永久的塑性体积改变。故当材料有较大的塑性变形（弹性变形相对很小）时，可近似认为体积是不可压缩的。此外，静水压力对屈服应力的影响也不大。

14.1.4 率相关性

塑性应变可能是加载速度的函数。对于受高速撞击载荷或爆炸载荷作用的结构，就需要考虑应变率效应对材料性质的影响，这就是率相关性。但在一般加载速度条件下，塑性应变可不考虑时间效应，称为率无关性。

14.1.5 屈服准则

对于单向受拉试件，可以通过简单地比较轴向应力与材料的屈服应力来确定是否有塑性变形发生。然而，对于一般的应力状态，是否到达屈服点并不是很明显。

屈服准则是一个可以用来与单轴测试的屈服应力相比较的应力状态的标量表示。因此，知道了应力状态和屈服准则，就能确定是否有塑性应变产生。屈服准则的值也叫等效应力，当等效应力超过材料的屈服应力时，将会发生塑性变形。

von Mises 屈服准则是一个比较通用的屈服准则，尤其适用于金属材料。对于 von Mises 屈服准则，其等效应力 σ_e 为

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \tag{14-1}$$

式中，σ_1、σ_2、σ_3 为 3 个主应力。

可以在主应力空间画出 von Mises 屈服面，如图 14-2 所示。

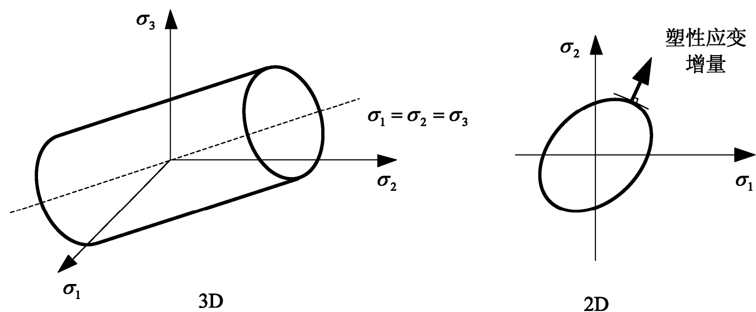


图 14-2　主应力空间中的 von Mises 屈服面

在三维主应力空间中，von Mises 屈服面是一个以 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 为轴的圆柱面；在二维主应力空间中，屈服面是一个椭圆。屈服面内的任何应力状态都是弹性的，屈服面外部的任何应力状态都是塑性的。

14.1.6 流动准则

流动准则描述了材料发生屈服时，塑性应变的方向。如果塑性应变增量（率）指向屈服面的外法向，这种流动准则叫做相关流动准则（见图 14-2，正交流动法则），如果使用其他的流动准则，则叫做不相关流动准则。

14.1.7 强化准则

与单轴情况相联系，强化准则规定了材料的应变强化，它描述在塑性流动过程中怎样改变屈服面——初始屈服面随着塑性应变的增加是怎样发展的。等向强化准则和随动强化准则是最简单的两种模型。

（1）等向强化准则

等向强化预测初始屈服面随塑性流动将均匀扩张。此强化模型假设塑性变形是各向同性过程，忽略 Bauschinger 效应，如图 14-3 所示。

（2）随动强化准则

等向强化模型并未考虑 Bauschinger 效应，故在分析应力做反复变化的问题时，往往会带来较大的误差。基于这种情况，经常采用的另一种简化模型就是随动强化模型。该模型认为，屈服面随着塑性变形的过程而在应力空间中做刚性移动。这时，屈服面的大小和形状都没有改变，如图 14-4 所示。

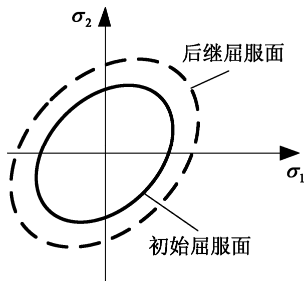


图 14-3　等向强化的屈服面变化图

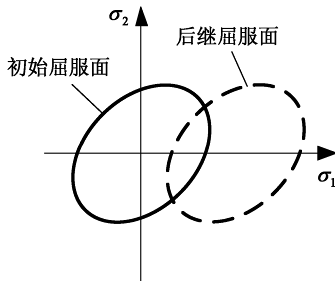
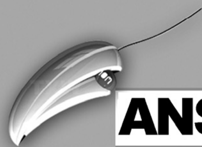


图 14-4　随动强化的屈服面变化图



14.1.8 弹塑性材料的简化模型

ANSYS 提供了多种弹塑性材料模型，本书只介绍其中两种：双线性随动强化模型和多线性随动强化模型（见图 14-5）。这两种模型均包含了 Bauschinger 效应，满足 von Mises 屈服准则和相关流动准则。

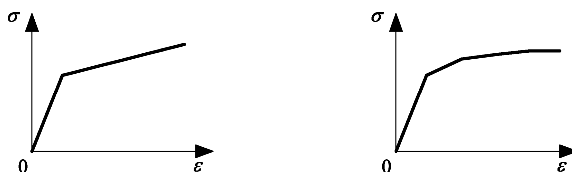


图 14-5　双线性随动强化模型（左）和多线性随动强化模型（右）

对于双线性随动强化模型，需要输入的材料参数包括杨氏模量、泊松比、屈服应力和切向模量(应力-应变曲线中在屈服点以后的模量)。GUI 方式为 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→linear→Elastic→Isotropic；Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear。

对于多线性随动强化模型，需要输入的材料参数包括杨氏模量、泊松比、应力-应变数据点。需要注意的是，杨氏模量必须与应力-应变曲线的第一点相对应。对于超过曲线末端的应变值，假设为理想弹塑性材料，即切向模量为零的情况。GUI 方式为 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→linear→Elastic→Isotropic； Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Multilinear（General）。第 14.3 节给出了定义多线性随动强化材料的示例。

14.1.9 有限元网格模型的特殊要求

对于塑性分析，高阶单元仅使用角节点的积分点，其计算精度与低阶单元相同。因此，应优先选用低阶单元用于塑性分析，同时划分足够细密的网格，大变形分析时还须确保单元在变形过程中具有较好的单元形状。

14.1.10 弹塑性求解控制

由于弹塑性是一种与路径相关的非线性现象，因此需要缓慢加载，使用多个子步求解，推荐开启自动时间步长控制（默认设置）。

14.2 超弹性涉及的问题及处理方法

14.2.1 超弹性

橡胶类材料具有超弹性特性，这类材料可承受十分大的可恢复（弹性）变形，但体积改

变极小（不可压缩，泊松比一般在 0.48～0.5 之间），其变形过程是保守的（与加载路径无关）。

14.2.2 超弹性材料的简化模型

一般工程材料（如金属）的应力状态用一条应力-应变曲线来描述，而超弹性材料通常采用应变能密度函数 W 导出应力分量。

在 ANSYS 中，假定超弹性材料是各向同性的，在每个方向都有完全相同的材料特性。在这种情况下，可以根据应变不变量 I_1、I_2 和 I_3 写出应变能密度函数。特别地，对于不可压缩的超弹性材料，$I_3=1$。

ANSYS 提供了多种超弹性材料模型，本书只介绍工程中常用的 Mooney-Rivlin 模型，即

$$W=\sum_{i,j=0}^{\infty}C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j \tag{14-2}$$

式中，C_{ij} 为材料常数，采用应力的单位。

ANSYS 可使用 2、3、5 或 9 个材料常数定义超弹性材料，其中两参数的 Mooney-Rivlin 模型为

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \tag{14-3}$$

两参数模型适用于应变大约为 100%（拉）和 30%（压）的情况，更高阶的 Mooney-Rivlin 模型对于较大应变的求解可得到更好的近似。

对于两参数的 Mooney-Rivlin 模型，需要输入的材料参数包括泊松比、C_{10} 和 C_{01}，而杨氏模量不参与计算。GUI 方式为 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→linear→Elastic→Isotropic；Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→Nonlinear→Elastic→Hyperelastic→Mooney-Rivlin→2 parameters。第 14.4 节给出了定义两参数 Mooney-Rivlin 模型的示例。

14.2.3 有限元网格模型的特殊要求

对于超弹性分析，结构将经历非常大的变形和应变，应优先选用低阶单元建立有限元网格模型（杆单元和梁单元不支持超弹性分析），同时确保单元在变形过程中具有较好的单元形状。

14.2.4 单元技术的特殊要求

为了克服不可压缩材料带来的数值困难（如体积锁定等），须引入混合 U/P 单元技术。对于三维模型，建议按表 14-1 选择单元和单元选项。若在实际应用中遇到收敛困难，可调整单元选项。

表 14-1 超弹性问题推荐的单元和单元选项

单　元	单 元 选 项
SHELL181	K3=0（Reduced Integration，带沙漏控制的缩减积分，默认）
SOLID185	K2=0（Full Integration，基于 $\overline{B}$ 方法的完全积分，默认）；K6=1（Mixed U/P，混合 U/P）
SOLID186	K2=0（Reduced Integr，缩减积分，默认）；K6=1（Mixed U/P，混合 U/P）
SOLID187	K6=1（Mixed U/const P，混合 U/P）

14.2.5 超弹性求解控制

超弹性包含了几何非线性效应，须在求解选项中开启大变形效应（NLGEOM,ON）。同时，应缓慢施加载荷，使用多个子步求解，推荐开启自动时间步长控制（默认设置）。

14.3 弹塑性材料非线性分析实例

铸铝试件如图 14-6 所示，分析铸铝试件经历拉伸加载-卸载-反向加载-卸载过程中的弹塑性响应。已知条件如下：

1）拉伸和压缩载荷幅值均为 22 500N。

2）铸铝的材料特性：杨氏模量为 70GPa，泊松比为 0.3，屈服极限为 280MPa，强度极限为 310MPa，铸铝的应力-应变数据列于表 14-2。

3）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

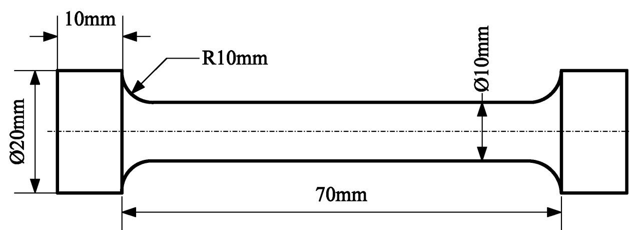


图 14-6 铸铝试件

表 14-2 铸铝的应力-应变数据

应变	0.004	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03
应力/MPa	280	292	300	305	308	310

STEP 1 网格划分

1）利用 CAD 软件建立铸铝试件的三维模型，并导入 HyperMesh。由于模型及载荷具有对称性，只需建立 1/8 几何模型。

2）利用 Geom 页面中的 solid edit 面板，将 1/8 几何模型切分为三块，如图 14-7 所示。

3）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将图 14-7 中的面 1 划分为 35 个四边形单元，并放置于 Geometry 组件集。

4）利用 3D 页面中的 solid map 面板，将几何模型划分为 1330 个六面体单元，并放置于 Cast_aluminium 组件集，如图 14-8 所示。

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。铸铝试件为六面体单元，选用 SOLID185 单元，并设置单元选项 K2=2（Enhanced Strain），即采用增强应变公式方法，以提高计算精度。

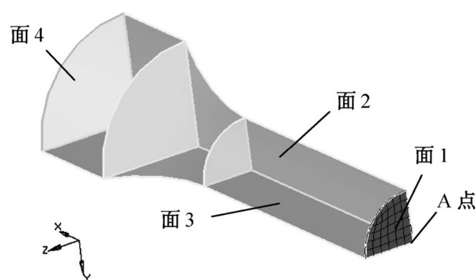


图 14-7 1/8 几何模型

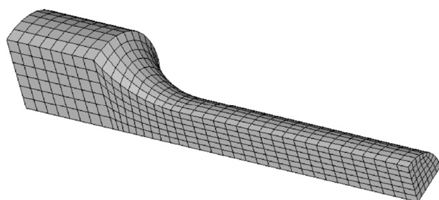


图 14-8 铸铝的 1/8 六面体网格模型

STEP 3 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为铸铝试件定义材料特性。Material type 选择 MPDATA 单选按钮，勾选 TB options 复选框，Number of temp 设置为 1，杨氏模量 EX 为 70 000MPa，泊松比 NUXY 为 0.33，TB label 设置为 KINH，即多线性随动强化模型，Number of data points 设置为 6，TB type 选择 TBPT 单选按钮，输入表 14-2 中的应力-应变数据，X 列为应变，Y 列为应力，如图 14-9 所示。

Material

Name: Aluminium
ID: 1 Color:
Material type:
MPDATA
Non uniform temp table
TB options
MP
Number of temp: 1

Material Prop	STLOC	T1
MPTEMP	1	0
EX	1	70000
NUXY	1	0.33

TABLE DATA

TB label: KINH　Number of temp: 1　TBOPT:
TB type: TBDAT TBPT　Number of data points: 6　EOSOPT:

TBTEMP		T1
TEMP		0
KMOD		1
TBPT	X	Y
TBPT,C1	0.004	280
TBPT,C2	0.01	292
TBPT,C3	0.015	300
TBPT,C4	0.02	305
TBPT,C5	0.025	308
TBPT,C6	0.03	310

Update　Cancel

图 14-9 定义多线性随动强化材料参数

STEP 4 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Cast_aluminium 组件

集赋予单元和材料。

STEP 5 边界条件定义

1）利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 14-7 中面 1 所有节点的 UX 自由度，即勾选 dof1，并将约束载荷放置于 constraints_x 载荷集。

2）约束图 14-7 中面 3 所有节点的 UY 自由度，即勾选 dof2，并将约束载荷放置于 constraints_y 载荷集。

3）约束图 14-7 中面 2 所有节点的 UZ 自由度，即勾选 dof3，并将约束载荷放置于 constraints_z 载荷集。

STEP 6 载荷定义

1）利用 Analysis 页面中的 forces 面板，对图 14-7 中的面 4 的所有节点施加 *X* 方向的力，大小为 22500/4/47N，并将载荷放置于 force1 载荷集。

2）对图 14-7 中的面 4 的所有节点施加−*X* 方向的力，大小为 22500/4/47N，并将载荷放置于 force2 载荷集。

注意：施加力载荷时，应确保所施加的合力为所需值。面 4 共有 47 个节点，且为 1/4 圆面，为了对整个圆面施加 22 500N 的力，需要对每个节点施加 22500/4/47N 的力。

STEP 7 创建载荷步

1）在 Analysis 页面中，利用 load steps 面板创建载荷步 step1，包含 constraints_x、constraints_y、constraints_z 和 force1 载荷集，模拟拉伸加载。

2）利用 load steps 面板创建载荷步 step2，包含 constraints_x、constraints_y 和 constraints_z 载荷集，模拟卸载。

3）利用 load steps 面板创建载荷步 step3，包含 constraints_x、constraints_y、constraints_z 和 force2 载荷集，模拟反向加载。

4）利用 load steps 面板创建载荷步 step4，包含 constraints_x、constraints_y 和 constraints_z 载荷集，模拟卸载。

STEP 8 求解控制

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 14-10），STATIC 表示进行静力分析。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 14-11），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 14-10　ANTYPE 命令



图 14-11　NLGEOM 命令

5）单击 AUTOTS 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 14-12），表示开启自动时间步长控制。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

6）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 50，NSBMX 设置为 100，NSBMN 设置为

30（见图 14-13），表示设置载荷子步为 50，最大载荷子步为 100，最小载荷子步为 30。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 14-12　AUTOTS 命令

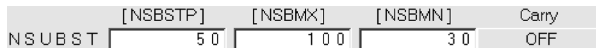


图 14-13　NSUBST 命令

7）单击 OUTRES 按钮，将 FREQ 设置为 ALL（见图 14-14），表示将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 14-14　OUTRES 命令

8）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 LSSOLVE 按钮，设置最小的载荷步 LSMIN 为 1，最大的载荷步 LSMAX 为 4，载荷步增量 LSINC 为 1，如图 14-15 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

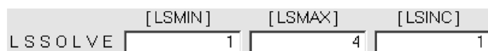


图 14-15　LSSOLVE 命令

9）当前的控制卡片如图 14-16 和图 14-17 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 14-16　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 14-17　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 7 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
NLGEOM,ON
AUTOTS,ON
NSUBST,50,100,30
```

```
OUTRES,ALL,ALL
LSSOLVE,1,4,1
```

STEP 9 求解并查看结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Cast_aluminium_static.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Cast_aluminium_static.cdb 文件，并自动求解所有载荷步。

1）进入通用后处理器 POST1，读取最后子步（TIME=4）的结果，查看残余变形和残余 von Mises 应力，如图 14-18 和图 14-19 所示。

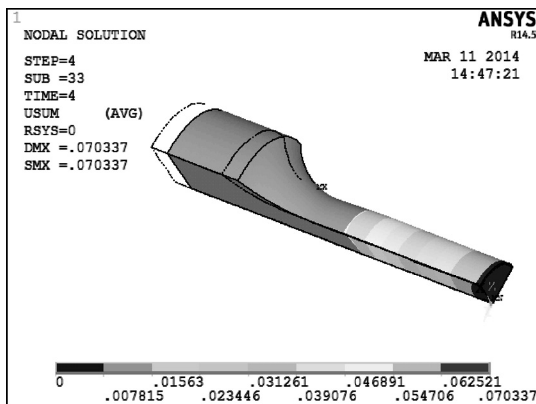


图 14-18 残余变形云图

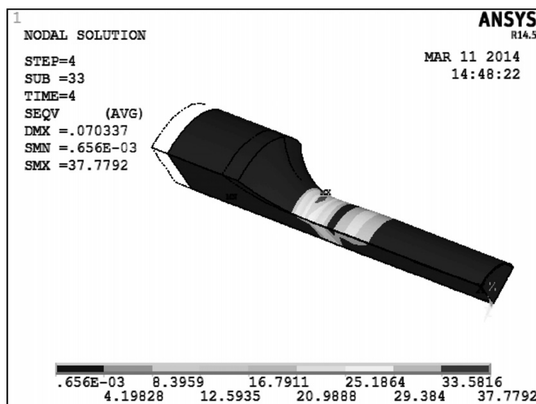


图 14-19 残余 von Mises 应力云图

由图 14-18 和图 14-19 可知，完全卸载后，铸铝产生了最大 0.070 337mm 的残余变形，最大残余 von Mises 应力为 37.779 2MPa。

2）进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义图 14-7 中 *A* 点的 *X* 方向应力、*X* 方向弹性应变、*X* 方向塑性应变，再将弹性应变和塑性应变求和，求得总应变。绘制应力-总应变曲线，如图 14-20 所示。

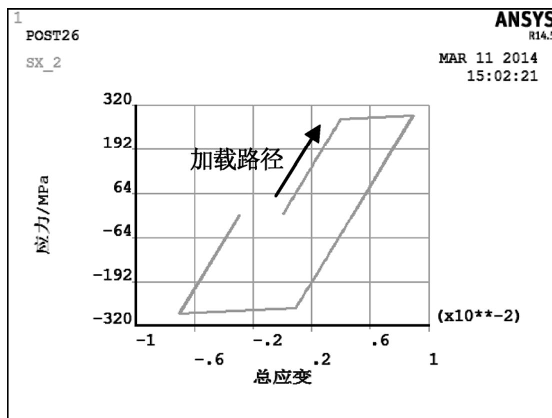


图 14-20 *X* 方向应力-总应变曲线

由图 14-20 可知，经过一个加载循环（拉伸加载-卸载-反向加载-卸载）之后，铸铝产生了永久变形，即塑性变形。

14.4 超弹性材料非线性分析实例

图 14-21 为圆形橡胶薄板的几何模型，薄板外边缘铰支约束，圆面承受 0.3MPa 压力（-Z 方向）的作用，求薄板的超弹性变形。已知条件如下：

1）薄板厚度为 12mm。

2）薄板为橡胶材料，两参数的 Mooney-Rivlin 模型参数 C_{10} =0.551 58MPa，C_{01} =0.137 90MPa，泊松比为 0.5。

3）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

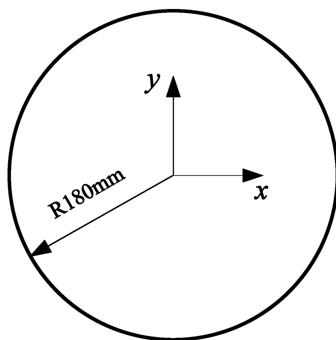


图 14-21 圆形薄板的几何模型

STEP 1 网格划分

本例的几何模型较简单，可直接利用 HyperMesh 建立 1/4 圆形模型，再划分网格。

1）灵活利用 Geom 页面中的 nodes、lines 和 surfaces 面板，建立 1/4 圆形模型，并放置于 Geometry 组件集，如图 14-22 所示。

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将 1/4 圆形划分为 32 个四边形单元，并放置于 Shell 组件集，如图 14-23 所示。

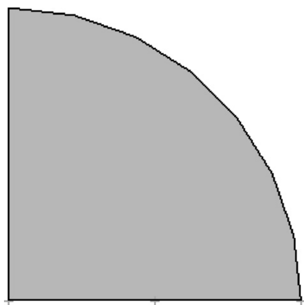


图 14-22 圆形薄板的 1/4 几何模型

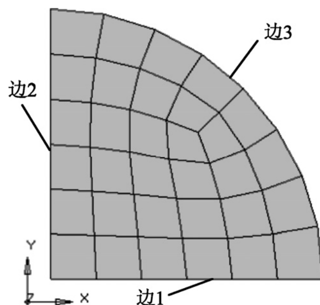


图 14-23 圆形薄板的 1/4 有限元模型

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。圆形薄板选用 SHELL181 单元，并保持默认单元选项。

STEP 3 定义板壳截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Plate，Section type 改为 SHELL，如图 14-24 所示。单击 Create/Edit 按钮，弹出板壳横截面设置卡片。设置 PLIES=1，表示单层板壳。设置 TK=12，定义板壳的厚度为 12mm。设置 NUMPT（1）=3，定义沿板壳厚度方向的积分点个数为 3，这是 ANSYS 的默认值，如图 14-25 所示。最后单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

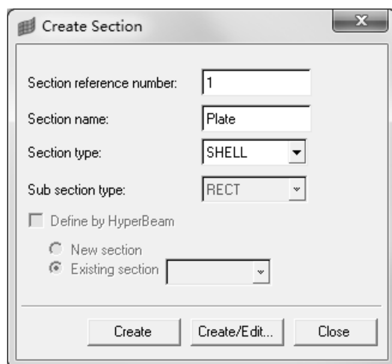


图 14-24　Create Section 对话框

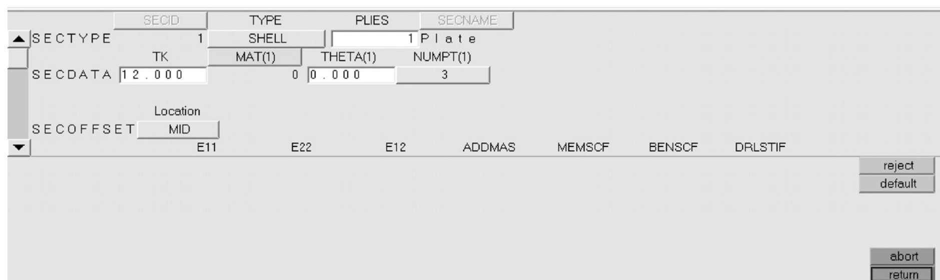


图 14-25　板壳横截面设置卡片

3）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

4）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 4 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为橡胶薄板定义材料。Material type 选择 MPDATA 单选按钮，勾选 TB options 复选框，Number of temp 设置为 1，杨氏模量 EX 不参与计算，可设置为 1MPa，泊松比 NUXY 为 0.5，TB label 设置为 AHYPER，Number of data points 设置为 2，TB type 选择 TBDAT 单选按钮，TBDATA,C1 为 C_{10}=0.551 58MPa，TBDATA,C2 为 C_{01}=0.137 90MPa，如图 14-26 所示。

注意：HyperMesh 并未提供超弹性材料类型 HYPER，这里临时选用各向异性的超弹性材料类型 AHYPER。在 HyperMesh 输出.CDB 文件后，再将 AHYPER 修改为 HYPER。

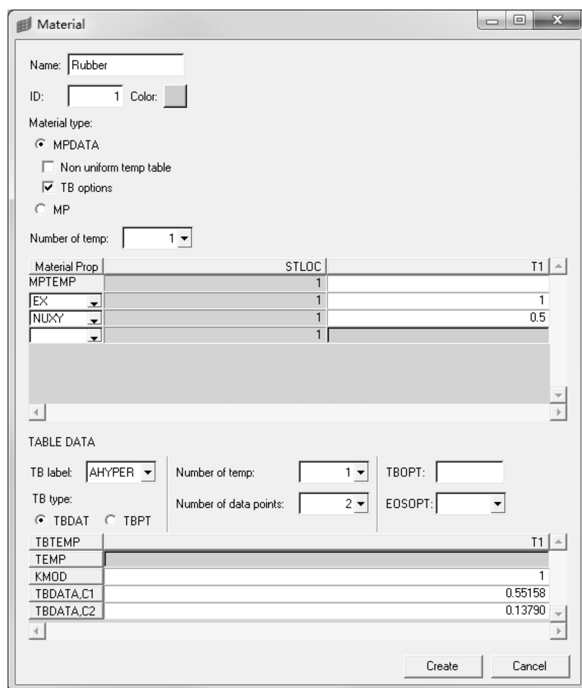


图 14-26　定义超弹性材料参数

STEP 5 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Shell 组件集赋予单元、横截面和材料。

STEP 6 边界条件定义

1）利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 14-23 中的边 1 的所有节点的 UY、ROTX、ROTZ 自由度，即勾选 dof2、dof4、dof6，并将约束载荷放置于 constraints1 载荷集。

2）约束图 14-23 中的边 2 的所有节点的 UX、ROTY、ROTZ 自由度，即勾选 dof1、dof5、dof6，并将约束载荷放置于 constraints2 载荷集。

3）约束图 14-23 中的边 3 的所有节点的 UX、UY、UZ 自由度，即勾选 dof1、dof2、dof3，并将约束载荷放置于 constraints3 载荷集。

STEP 7 载荷定义

利用 Analysis 页面中的 pressures 面板，对所有单元施加大小为 0.3MPa 的压力载荷，并将载荷放置于 pressure 载荷集。压力方向通过指定表面节点的顺序确定（右手法则），如图 14-27 所示。

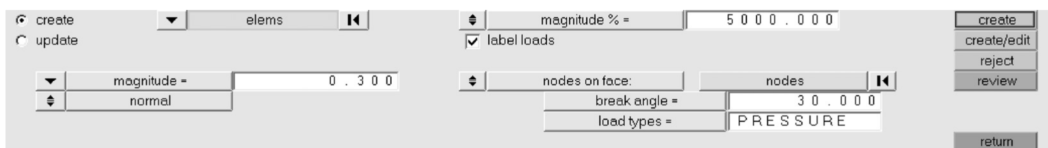


图 14-27　施加压力载荷

STEP 8 求解控制

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 14-28），STATIC 表示进行静力分析。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 14-29），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

5）单击 TIME 按钮，将 time 设置为 0.3（见图 14-30），表示设置求解结束时间为 0.3s，这是为了方便绘制变形-载荷曲线。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

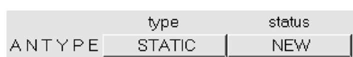


图 14-28　ANTYPE 命令



图 14-29　NLGEOM 命令

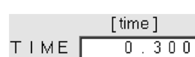


图 14-30　TIME 命令

6）单击 AUTOTS 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 14-31），表示开启自动时间步长控制。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

7）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 400，NSBMX 设置为 1000，NSBMN 设置为 25（见图 14-32），表示设置载荷子步为 400，最大载荷子步为 1000，最小载荷子步为 25。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 14-31　AUTOTS 命令



图 14-32　NSUBST 命令

8）单击 OUTRES 按钮，将 FREQ 设置为 ALL（见图 14-33），表示将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 14-33　OUTRES 命令

9）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

10）当前的控制卡片如图 14-34 和图 14-35 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 14-34　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 14-35　控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 8 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
NLGEOM,ON
TIME,0.3
AUTOTS,ON
NSUBST,400,1000,25
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
```

STEP 9 修改.CDB 文件

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Circular_plate_static.cdb 文件，并用文本编辑器（如记事本）打开，将各向异性的超弹性材料类型 AHYPER 修改为超弹性材料类型 HYPER，之后保存文件。

STEP 10 求解并查看结果

将修改后的 Circular_plate_static.cdb 文件输入到 ANSYS，ANSYS 将自动进行非线性分析。

1）进入通用后处理器 POST1，读取最后子步（TIME=0.3）的结果，查看薄板变形，如图 14-36 所示。

由图 14-36 可知，橡胶薄板产生了非常大的变形，其圆心点的挠度高达 310.477mm。

2）进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义薄板圆心点的 Z 方向位移，并绘制位移-压力曲线，如图 14-37 所示。

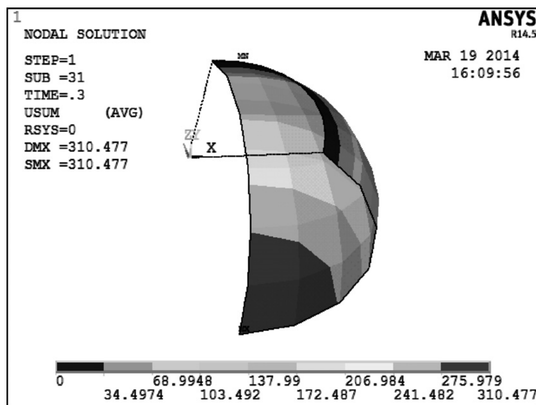


图 14-36　薄板变形云图

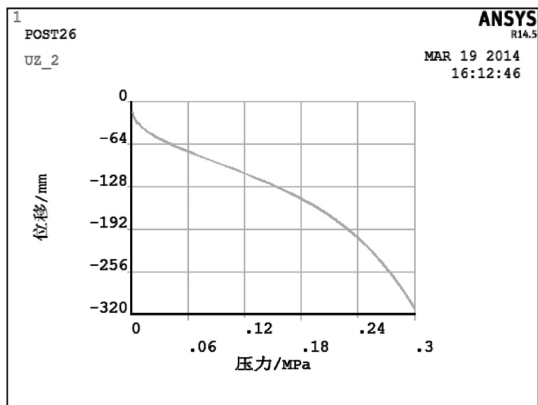


图 14-37　Z 方向位移-压力曲线

由图 14-37 可知，薄板圆心点的挠度与表面压力呈非线性关系。

14.5 本章小结

1）本章提供了两个实例。实例采用 HyperMesh 建立了有限元模型，并设置了所有的非线性求解选项。基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

2）材料非线性通常包含几何非线性效应，除定义合适的材料特性外，求解过程也应开启大变形效应，采用缓慢加载可增强收敛性。

3）事实上，材料非线性可包含非常多的类型，本章仅介绍了其中的两种：弹塑性和超弹性。



第 15 章　接触非线性分析

接触非线性是边界非线性问题最典型的例子。接触和碰撞是生产和生活中普遍存在的力学现象。例如，汽车车轮与路面的接触，发动机活塞与气缸的接触，轴与轴承的接触，齿轮传动过程中齿面的相互接触等。

相对于几何非线性和材料非线性问题，对接触非线性问题的研究相对滞后。这是因为接触是一种高度非线性行为。接触边界的位置、范围以及接触面上力的分布和大小不能事先给定，其确定须依赖于对整个问题的求解。同时，接触问题往往伴随几何非线性和材料非线性。

接触问题可分为两种基本类型：刚体-柔体接触和柔体-柔体接触。在刚体-柔体接触问题中，接触体的一个或多个表面被当做刚体。一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，可以假定为刚体-柔体接触，例如金属成形问题。柔体-柔体接触是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体（有相似的刚度），如栓接法兰。

ANSYS 14.5 已支持 5 种接触类型：面-面接触、点-面接触、点-点接触、线-线接触和线-面接触。面-面接触和点-面接触适用于大多数的工程问题，应用最广泛，本书只介绍这两种类型的接触问题。

本章主要介绍了接触非线性所涉及的问题及处理方法，给出了利用 HyperMesh 进行过盈配合、接触碰撞（面-面接触和点-面接触）、螺栓预紧问题的前处理和求解控制的实例，并分别解释了分析结果。

15.1　面-面接触

面-面接触用于模拟刚体-柔体或柔体-柔体之间的接触。由于面-面接触最能反映工程实际问题，因此得到最广泛的应用。

15.1.1　建立面-面接触模型

对于三维问题，ANSYS 使用 TARGE170 单元模拟目标面（通常为刚度较大的接触体，包括刚体），CONTA173 或 CONTA174（高阶单元）单元模拟接触面。ANSYS 通过相同的实常数号来识别每一个接触对。因此，应为接触对指定相同的实常数号，不同的接触对必须指定不同的实常数号。第 15.4 节和第 15.7 节给出了柔体-柔体接触的实例，第 15.5 节给出了刚体-柔体接触的实例。

建立面-面接触模型应注意以下几点：

1）接触面应具有较密的网格，而目标面可以采用较粗糙的网格。

2）必须确保目标单元和接触单元法向相对。

3）为使接触表面更加光滑，可采用高阶单元划分网格。

4）刚性目标面不需要下伏单元，而由 TARGE170 单元直接构成。

5）若要控制刚性目标面的运动，应使用 PILOT 控制节点，且只在 PILOT 节点施加载荷和约束。

15.1.2 面-面接触分析的关键技术

目标单元和接触单元均提供多个单元选项，连同实常数共同控制接触行为。实常数和单元选项的设置对于成功求解接触问题十分重要。

1．实常数

ANSYS 提供了多个实常数选项，对于结构分析，最关键的是 FKN、FTOLN 和 CNOF。

（1）FKN 法向罚刚度系数

在接触算法中，接触单元被限制不得穿透目标面，但是，目标单元可以穿透接触面，如图 15-1 所示。正确表达两个物体之间发生接触而不穿透对于计算精度和收敛性均十分重要。外力 F、接触刚度 k_c 与穿透量 Δl 满足

$$F = k_c \Delta l \tag{15-1}$$

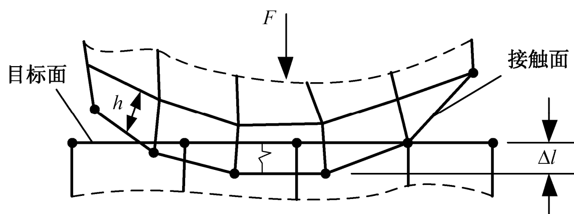


图 15-1　接触模型示意图

为了使接触模型在数学上保持平衡，需要有穿透值（$\Delta l \to 0$），而物理接触的实体不存在穿透值（$\Delta l = 0$）。为了逼近物理事实，应采用较大的接触刚度 k_c，但太大的接触刚度容易导致收敛问题，太小的接触刚度则不符合物理事实。

在仿真中，通常不直接给定接触刚度的数值，而使用法向罚刚度系数 F_{kn}（对应于实常数 FKN）来控制接触刚度，它们之间满足

$$k_c = F_{kn} f(k_e) \tag{15-2}$$

式中，$f(k_e)$ 为接触体下层单元刚度的函数。

在接触分析中，不收敛问题多是由于使用了太大的接触刚度而引起的。ANSYS 默认设置 FKN=1，一般可以满足需要。若遇到收敛问题，可以尝试减小 FKN，FKN 在 0.01～0.1 之间。

（2）FTOLN 穿透容差系数

FTOLN 用于控制穿透容差，其默认值为 0.1，表示允许目标单元穿透接触单元的极限为 0.1h（h 为接触单元下伏单元的平均厚度，如图 15-1 所示）。若 ANSYS 检测到穿透大于容差极限，则认为求解不收敛。若遇到收敛问题，通常可减小 FKN，而不必增大 FTOLN。

（3）CNOF 接触面的偏移值

CNOF 用于指定一个接触面的偏移值，常用于模拟有小间隙或小穿透的问题，其默认值为 0。指定正的值来使整个接触面偏向目标面，指定负的值来使接触面离开目标面。

2．单元选项

ANSYS 提供了多个单元选项，本节主要介绍结构分析中最重要的选项及推荐设置，未列

出的单元选项采用默认值。

（1）TARGE170 目标单元

1）K1 单元阶次。K1 用于定义目标单元的阶次，只用于 AMESH 和 LMESH 命令（划分网格）。HyperMesh 接触向导依据下伏单元自动选择相应的目标单元阶次，而不必设置 K1，即采用默认值 K1=0（Low order elements）。

2）K2 刚性目标单元的边界条件。K2 用于控制刚性目标单元的边界条件。若 K2=0（Automatically constrained by ANSYS），则 ANSYS 自动约束刚性目标单元的所有自由度；若 K2=1（Specified by user），则由用户设置刚性目标单元的边界条件，此时，推荐使用 PILOT 控制节点。

注意：对于柔性目标单元，只能由用户控制柔性目标单元的边界条件，可设置 K2=0（Automatically constrained by ANSYS），即保持默认值。

（2）CONTA173/174 接触单元

1）K2 接触算法。K2 用于设置接触算法。对于面-面接触问题，ANSYS 提供了 5 种接触算法。增广 Lagrangian 方法（K2=0，Augmented Lagrangian）为默认算法，适用于一般的接触问题。

2）K4 接触探测点。接触探测点位于接触单元的积分点上，积分点一般在单元表面内部。在积分点上约束接触单元，来防止接触单元穿透目标单元。原则上，目标面能够穿透接触面。

默认情况下，ANSYS 的面-面接触单元使用 Gauss 积分点作为接触探测点（K4=0，On Gauss point（for general cases）），Gauss 积分点通常会比节点积分方案产生更精确的结果。图 15-2 和图 15-3 为两种接触探测方案。

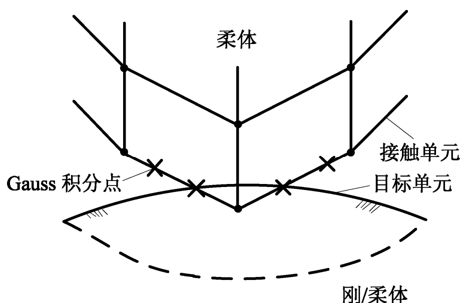


图 15-2 接触探测点位于 Gauss 积分点

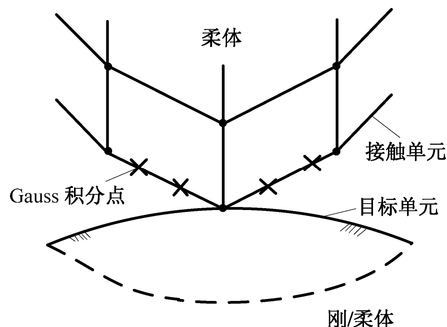


图 15-3 接触探测点位于节点

3）K5/K9 控制初始间隙/穿透。对于瞬态动力学分析，刚体运动一般不会引起问题。然而在静力分析中，当物体没有足够的约束时会产生刚体运动，有可能产生错误而终止计算。

当仅仅通过接触来约束刚体运动时，用户必须确保所建立的接触对是“刚好接触”的。但这通常会遇到以下问题：

① 物体外形常常是复杂的，很难确定第一个接触点发生在哪里。

② 即使实体模型在初始时处于接触状态，在网格划分后由于数值舍入误差，两个面的单元网格之间也可能会产生小缝隙。

③ 接触单元的积分点和目标单元之间可能存在小缝隙。

同理，目标面和接触面之间可能产生过大的初始穿透。在这种情况下，接触单元可能会高估接触力，导致不收敛或接触面之间脱开接触关系。

定义初始接触也许是建立接触分析模型时最重要的方面。ANSYS 提供了几种方法来调整接触对的初始接触条件，比较有效的方法是联合单元选项 K5 和 K9，推荐采用如下设置：

① 若要包含接触对的初始间隙和穿透，应保持默认设置 K5=0（No automated adjustment）和 K9=0（Include both initial geometrical penetration or gap and offset）。

② 若要忽略接触对的初始间隙和穿透，即建立“刚好接触对”，应设置 K5=1（Close gap with auto CNOF，见图 15-4）和 K9=1（Exclude both initial geometrical penetration or gap and offset，见图 15-5）。

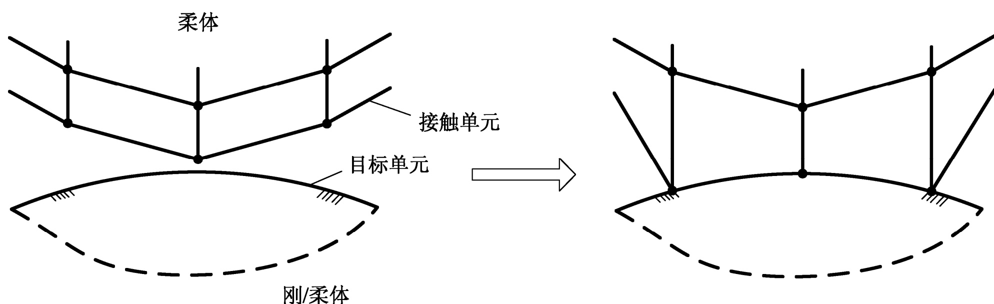


图 15-4　忽略初始间隙，KEYOPT（5）=1

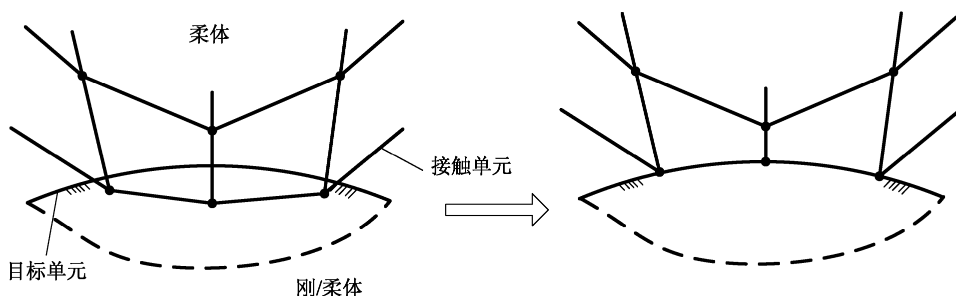


图 15-5　忽略初始穿透，KEYOPT（9）=1

③ 若要采用几何穿透模拟过盈配合，应设置 K5=0（No automated adjustment）和 K9=2（Include both initial geometrical penetration or gap and offset, but with ramped effects）。

④ 若要采用接触面偏移（CNOF）模拟过盈配合，应设置 K5=0（No automated adjustment）和 K9=4（Include offset only （exclude initial geometrical penetration or gap）, but with ramped effects）。

4）K7 时间步长控制/碰撞约束。时间步长控制是一个自动时间步长特征，这个特征预测什么时间接触单元的状态将发生变化，并二分当前时间步。碰撞约束用于瞬态动力学分析，以确保碰撞过程中接触界面的动量和能量守恒。

对于大多数情况，在求解中只需开启自动时间步长控制，而不必更改 K7 的默认值（K7=0，No control）。

对于碰撞问题，应注意如下几点，以满足接触界面的动量和能量守恒。

① 设置时间步长之前，应开启非线性控制选项，使用命令：SOLCONTROL,ON,ON。

② 开启自动时间步长控制（AUTOTS,ON）。

③ 采用非常小的时间步长，以捕捉碰撞过程。

④ 必须设置 K7=4（Use impact constraints for standard or rough contact （KEYOPT（12）=0 or 1）in a transient dynamic analysis with automatic adjustment of time increment）。

5）K8 不对称/对称接触。不对称接触定义为所有的接触单元在一个面上，而所有的目标单元在另一个面上的情况，有时候也称为“单向接触”。这在模拟面-面接触时最有效，可作为接触分析的默认设置（K8=0，No action）。

在某些情况下，不对称接触不能满足要求。这时，可以把每一个面既指定为目标面，又指定为接触面，然后在接触界面之间生成两组接触对（或仅是一个接触对，如自接触情况），这就称为对称接触，有时也称为“双向接触”。这时，应设置 K8=2（ANSYS internally selects which asymmetric contact pair is used at the solution stage（used only when symmetry contact is defined））。

6）K10 接触刚度更新。ANSYS 根据下伏单元的厚度和材料特性，计算一个默认的接触刚度。在大多数情况下，用户不需要定义接触刚度。然而，为了修正在分析过程中接触刚度的变化，如大应变引起的单元刚度变化，推荐设置 K10=2（Each iteration based on current mean stress of underlying elements （pair based）），允许 ANSYS 自动更新接触刚度。

7）K11 板壳厚度效应。一般地，板壳网格模型（包括接触单元）建立在板壳的中面，而接触应发生在板壳表面而非中面。为了考虑板壳的厚度效应，须设置 K11=1（Include）。

8）K12 接触面行为。面-面接触单元支持法向单向接触模式及其他力学表面作用模式。K12=0（Standard）为默认设置，表示法向单向接触，即当接触分开时，法向压力等于零，适用于一般情况。

15.2 点-面接触

尽管面-面接触得到了广泛应用，但它处理点-面接触问题时不够理想，例如梁的端点或板壳的边角与目标面的接触问题等。在这种情况下，可以在大多数接触区域应用面-面接触单元，而在少数接触角点应用点-面接触单元。

点-面接触可用于模拟一个表面和一个节点的接触，也可以通过把表面指定为一组节点，从而模拟面-面接触。与面-面接触相同，点-面接触也可以模拟刚体-柔体接触或柔体-柔体接触。

15.2.1 建立点-面接触模型

对于三维问题，ANSYS 使用 TARGE170 单元模拟目标面，CONTA175 单元模拟接触面。ANSYS 通过相同的实常数号来识别每一个接触对。因此，应为接触对指定相同的实常数号，

不同的接触对必须指定不同的实常数号。第 15.6 节给出了点-面接触的实例。

建立点-面接触模型应注意以下几点：

1）必须确保目标单元的法向指向接触单元。接触单元的法向控制采用单元选项 K4，详见第 15.2.2 节。

2）对于接触面，应避免使用高阶下伏单元，这通常带来收敛问题。对于目标面，可以使用高阶下伏单元。

3）刚性目标面不需要下伏单元，而由 TARGE170 单元直接构成。

4）若要控制刚性目标面的运动，应使用 PILOT 控制节点，且只在 PILOT 节点施加载荷和约束。

15.2.2 点-面接触分析的关键技术

与面-面接触分析相同，实常数和单元选项的设置对于成功求解点-面接触问题十分重要。

1．实常数

点-面分析对实常数的要求与面-面分析相同，详见第 15.1.2 节。

2．单元选项

除 K3 和 K4 外，CONTA175 使用的单元选项与 CONTA173/CONTA174 相同，详见第 15.1.2 节。

（1）K3 接触模型

ANSYS 提供了两种接触模型：基于力的模型（K3=0，Contact force based model（default））和基于牵引的模型（K3=1，Contact traction model）。对于一般情况，可采用默认设置 K3=0。

（2）K4 接触单元法向

对于 CONTA173/CONTA174，K4 用于控制接触探测点的位置。对于 CONTA175，单元使用节点本身作为积分点，因此只能采用节点积分方案（见图 15-3）。

对于 CONTA175，K4 用于控制接触单元的法向。一般地，接触单元法向应指向目标单元，即采用默认设置 K4=0（Normal to target surface（default））。

注意：接触是一种高度非线性行为，应使用多个子步求解，推荐开启自动时间步长控制（AUTOTS,ON）。若包含几何非线性效应，还须在求解选项中开启大变形效应（NLGEOM,ON）。

15.3 接触非线性分析实例 1：过盈配合

图 15-6 为轴-盘装配示意图，分析轴-盘过盈配合及将轴从盘心拔出过程中的变形和应力。轴-盘的几何参数（单位为 mm）如图 15-6 所示，其余已知条件如下：

1）轴-盘过盈量为 0.02mm。

2）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3。

3）摩擦系数为 0.15。

4）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

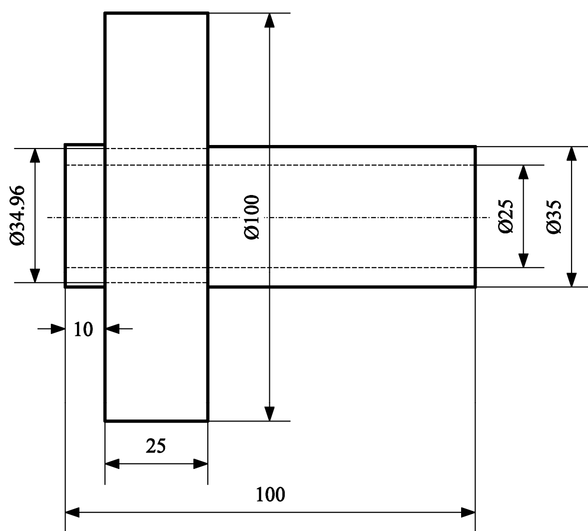


图 15-6　轴-盘装配示意图

STEP 1 网格划分

1）由于模型及载荷具有对称性，利用 CAD 软件建立轴-盘的 1/4 几何模型，并导入 HyperMesh，如图 15-7 所示。需要注意的是，本实例采用几何穿透模拟轴-盘的过盈配合，应严格按照图 15-6 中的尺寸建立几何模型。

2）利用 2D 页面中的 automesh 面板，为盘和轴划分高阶四边形单元（共 150 个单元），并分别放置于 Geometry_disc 和 Geometry_shaft 组件集，如图 15-7 所示。

3）利用 3D 页面中的 solid map 面板，将盘划分为高阶六面体单元（共 600 个单元），并将其放置于 Disc 组件集，如图 15-8 所示。

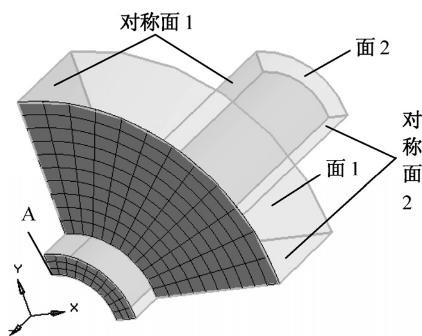


图 15-7　1/4 几何模型及面网格

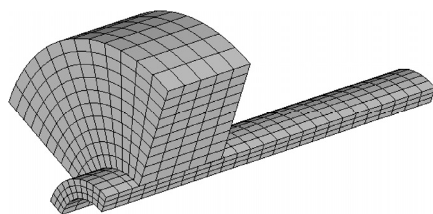


图 15-8　轴-盘的 1/4 六面体网格模型

4）利用 3D 页面中的 solid map 面板，将轴划分为高阶六面体单元（共 750 个单元），并将其放置于 Shaft 组件集，如图 15-8 所示。

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。盘和轴为高阶六面体单元，选用 SOLID186 单元，并设置单元选项 K2=1（Full Integration），选用完全积分方法。

STEP 3 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为盘和轴定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3，摩擦系数 MU 为 0.15。

STEP 4 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Disc 组件集和 Shaft 组件集赋予单元和材料。

STEP 5 创建接触对

1）利用 HyperMesh Utility 选项卡中的 Contact Manager 工具进入接触向导，如图 15-9 所示。

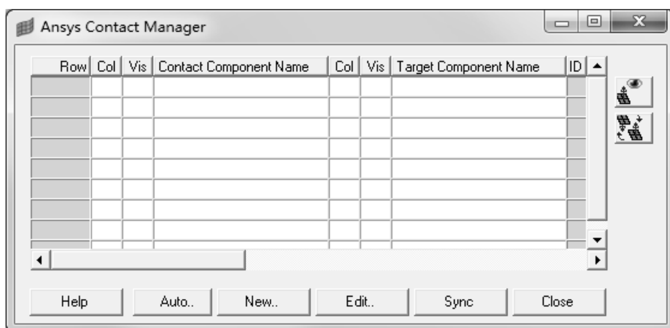


图 15-9　ANSYS 接触向导

2）单击 New 按钮，弹出 Create New Contact Pair 对话框，将 Creation method 设置为 Flexible，Contact type 设置为 3D，Create from 设置为 Surface to surface，Symmetric Contact 设置为 No，如图 15-10 所示。

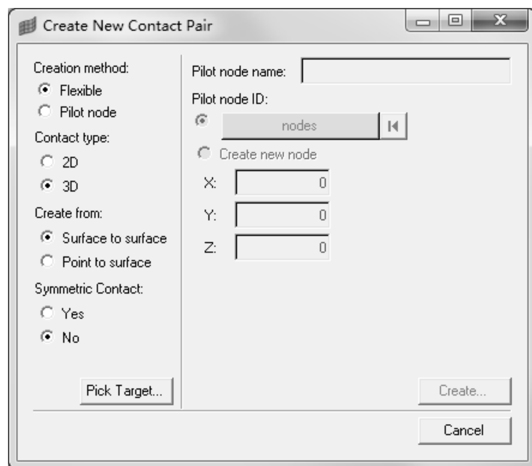


图 15-10　Create New Contact Pair 对话框

3）单击 Pick Target 按钮，选择 Shaft 组件集，单击 proceed 按钮，弹出 Target Elements Selection 对话框，如图 15-11 所示。同时，目标体的表面单元被提取出来。

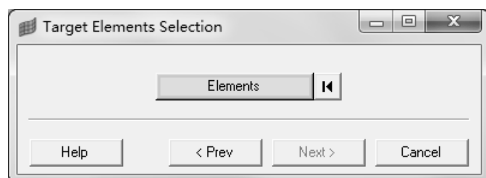


图 15-11 Target Elements Selection 对话框

4）单击 Elements 按钮，激活目标单元选择面板。选择位于轴外径的所有表面单元，之后单击 proceed 按钮，返回 Target Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。

5）单击 Next 按钮，弹出 Target Component Details 对话框，保持所有默认选项，如图 15-12 所示。

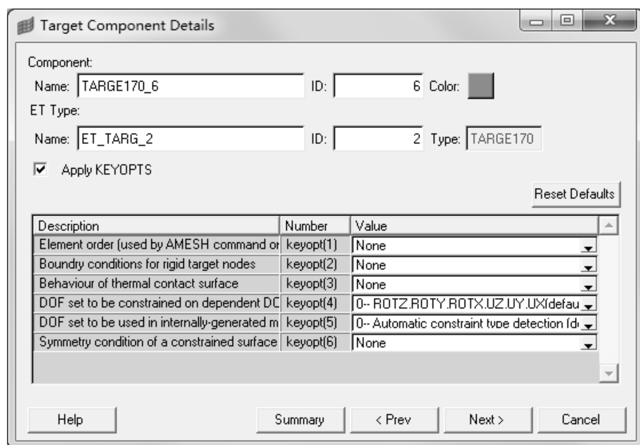


图 15-12 Target Component Details 对话框

说明：Target Component Details 对话框用于定义目标单元选项。对于本例，目标单元使用 TARGE170，可采用默认的单元选项，即保持默认值。

6）单击 Next 按钮，弹出 Contact Components Selection 对话框，如图 15-13 所示。

7）单击 Components 按钮，选择 Disc 组件集，单击 proceed 按钮，返回 Contact Components Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。单击 Next 按钮，弹出 Contact Elements Selection 对话框，如图 15-14 所示。同时，接触体的表面单元被提取出来。

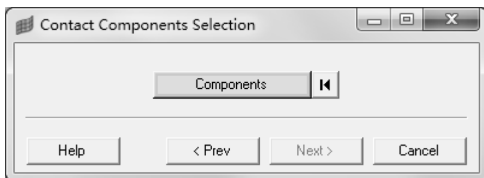


图 15-13 Contact Components Selection 对话框

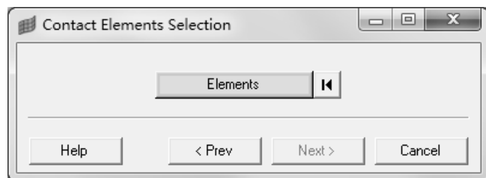


图 15-14 Contact Elements Selection 对话框

8）单击 Elements 按钮，激活接触单元选择面板。选择位于盘内径的所有表面单元，之后单击 proceed 按钮，返回 Contact Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。

9）单击 Next 按钮，弹出 Contact component Details 对话框，设置 keyopt（9）=2，keyopt

（10）=2，其余选项保持默认设置，如图 15-15 所示。

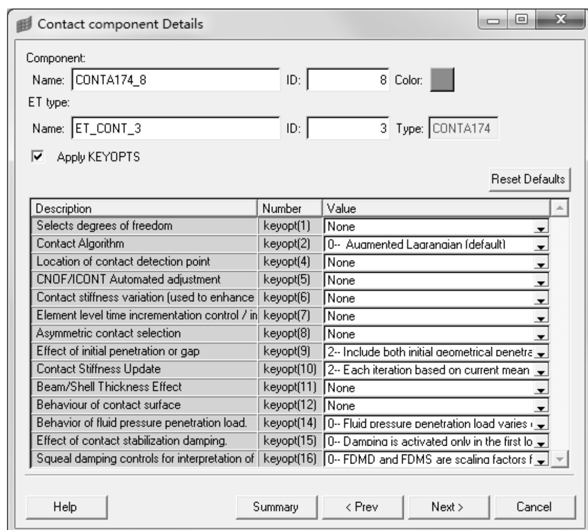


图 15-15　Contact component Details 对话框

说明：① Contact component Details 对话框用于定义接触单元选项。对于本例，接触单元使用 CONTA174。由于采用了几何穿透模拟过盈配合，应设置 K5=0 和 K9=2，而 K10=2 将允许 ANSYS 自动更新接触刚度，可以增强求解的收敛性。

② 若采用接触面偏移模拟过盈配合，除正确设置实常数 CNOF 外，还应设置 K5=0，K9=4 和 K10=2。

10）单击 Next 按钮，弹出 Contact Property 对话框，如图 15-16 所示。Contact Property 对话框用于设置实常数。对于本例，保持所有默认值即可。

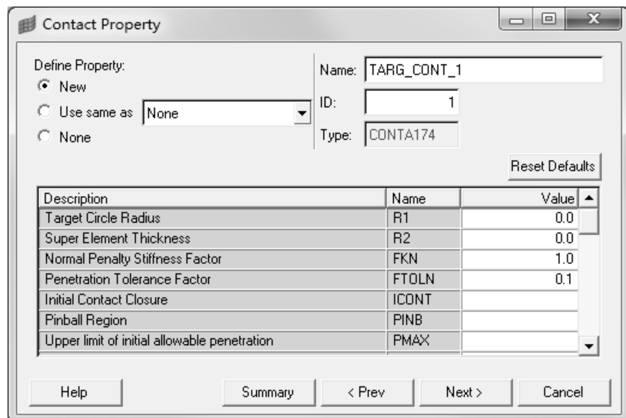


图 15-16　Contact Property 对话框

11）单击 Next 按钮，弹出 Contact Material 对话框。这里选择之前定义的材料，如图 15-17 所示。

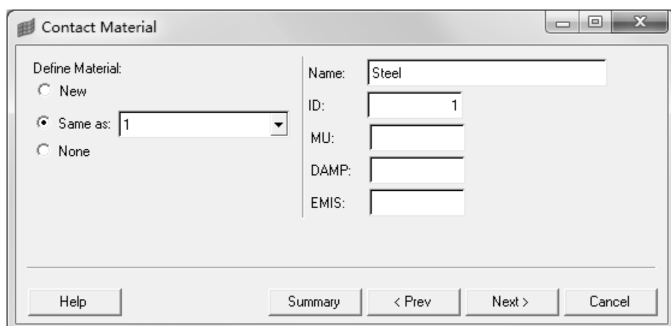
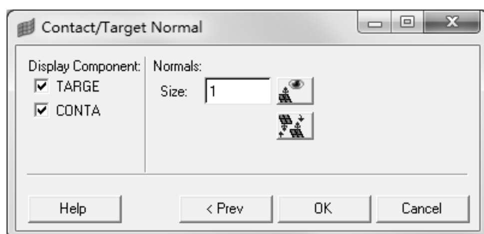


图 15-17 Contact Material 对话框

12）单击 Next 按钮，弹出 Contact/Target Normal 对话框，如图 15-18 所示。同时，显示出目标单元和接触单元的法向。

必须确保目标单元和接触单元法向相对，否则，ANSYS 求解器将产生错误。对于本例，须调整目标单元的法向。在 Contact/Target Normal 对话框中，取消勾选 CONTA 复选框，再单击 Reverse normals 按钮，将目标单元的法向反向，如图 15-19 所示。



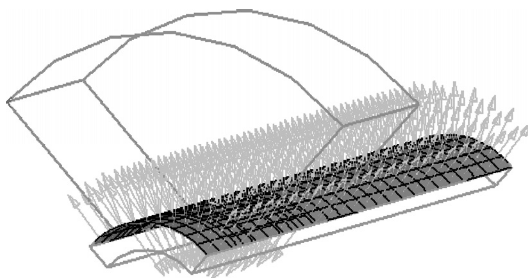


图 15-18 Contact/Target Normal 对话框　　图 15-19 目标单元和接触单元单元法向相对

13）单击 OK 按钮，弹出 ANSYS Contact Manager 对话框，如图 15-20 所示。

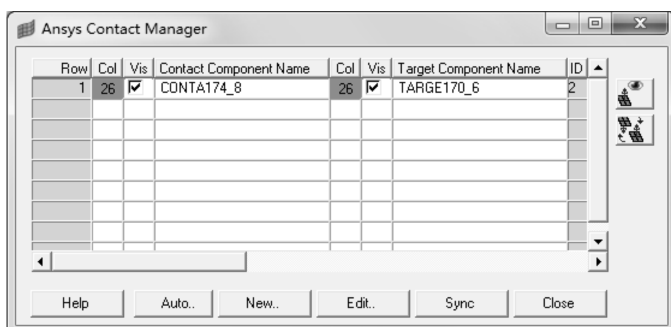


图 15-20 ANSYS Contact Manager 对话框

14）单击 Close 按钮，退出 ANSYS Contact Manager 对话框，完成接触对的创建。

至此，通过 HyperMesh 接触向导完成了盘和轴的接触定义，包括选择单元类型、设置单元选项、实常数和材料。目标单元 TARGE170 已放置于 TARGE170_6 组件集，接触单元 CONTA174 已放置于 CONTA174_8 组件集。

STEP 6 边界条件定义

1）利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 15-7 中面 1 的所有节点的 UX、UY、UZ 自由度，即勾选 dof1、dof2、dof3，并将约束载荷放置于 constraints_fixed 载荷集。

2）对于图 15-7 所示的对称面 1，约束所有节点的 UX 自由度，即勾选 dof1，并将约束载荷放置于 constraints_x 载荷集。

3）对于图 15-7 所示的对称面 2，约束所有节点的 UY 自由度，即勾选 dof2，并将约束载荷放置于 constraints_y 载荷集。

STEP 7 载荷定义

本例的载荷为自由度载荷，通过施加位移的方式模拟将轴从盘心拔出。利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，对图 15-7 中面 2 的所有节点设置自由度载荷 UZ=-40，并将自由度载荷放置于 pull 载荷集。

STEP 8 创建载荷步

1）在 Analysis 页面中，利用 load steps 面板创建载荷步 step1，包含 constraints_fixed、constraints_x 和 constraints_y 载荷集，模拟盘-轴过盈配合过程。

2）利用 load steps 面板创建载荷步 step2，包含 constraints_fixed、constraints_x、constraints_y 和 pull 载荷集，模拟将轴从盘心拔出过程。

STEP 9 求解控制

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

3）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 15-21），STATIC 表示进行静力分析。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

4）单击 NLGEOM 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 15-22），表示开启大变形效应。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 15-21　ANTYPE 命令



图 15-22　NLGEOM 命令

5）单击 AUTOTS 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 15-23），表示开启自动时间步长控制。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

6）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 50，NSBMX 设置为 100，NSBMN 设置为 30（见图 15-24），表示设置载荷子步为 50，最大载荷子步为 100，最小载荷子步为 30。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 15-23　AUTOTS 命令

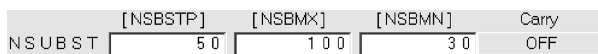


图 15-24　NSUBST 命令

7）单击 OUTRES 按钮，将 FREQ 设置为 ALL（见图 15-25），表示将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 15-25　OUTRES 命令

8）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 LSSOLVE 按钮，设置最小的载荷步 LSMIN 为 1，最大的载荷步 LSMAX 为 2，载荷步增量 LSINC 为 1，如图 15-26 所示。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

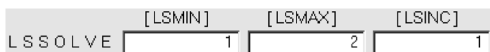


图 15-26　LSSOLVE 命令

9）当前的控制卡片如图 15-27 和图 15-28 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 15-27　控制卡片 1

TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 15-28　控制卡片 2

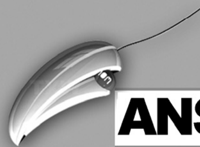
HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。本步骤添加了 7 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
NLGEOM,ON
AUTOTS,ON
NSUBST,50,100,30
OUTRES,ALL,ALL
LSSOLVE,1,2,1
```

STEP 10 求解并查看结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Interference_fit_static.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Interference_fit_static.cdb 文件，并自动求解所有载荷步。

1）进入通用后处理器 POST1，读取 TIME=1 和 TIME=1.50333 的结果，查看轴-盘过盈配合的应力云图，如图 15-29 和图 15-30 所示。



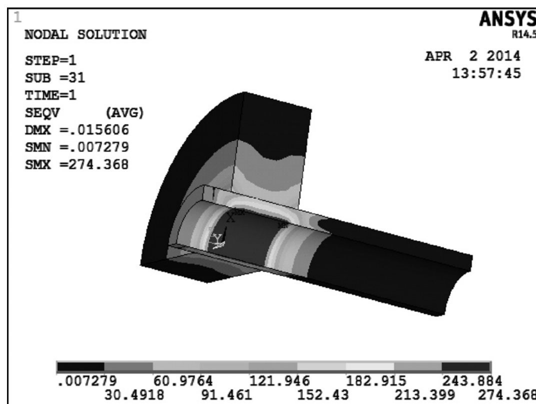


图 15-29　von Mises 应力云图（TIME=1）

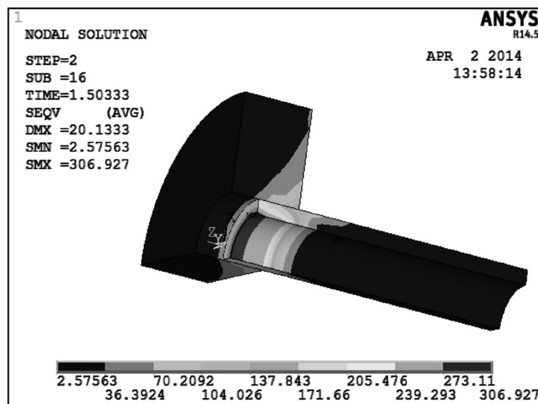


图 15-30　von Mises 应力云图（TIME=1.50333）

由图 15-29 可知，由于过盈量（0.02mm）产生的最大 von Mises 应力为 274.368MPa，位于轴的内径处。

由图 15-30 可知，在将轴从盘心拔出的过程中，最大 von Mises 应力为 306.927MPa，位于轴的内径处。

2）进入时间历程后处理器 POST26，读取图 15-7 中 A 点的 von Mises 应力，绘制应力-时间曲线，如图 15-31 所示。

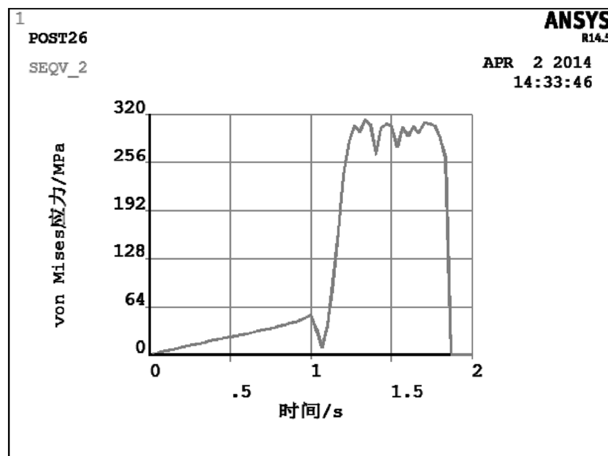


图 15-31　A 点的 von Mises 应力-时间曲线

由图 15-31 可知，在 0～1s 内（载荷步 1），A 点应力基本呈线性增加，这是因为几何穿透从 0 逐渐增加到 0.02mm。在 1～2s 内（载荷步 2），A 点应力波动较大，最后减小为 0，这是因为轴已经完全脱离盘的内孔。

15.4　接触非线性分析实例 2：钢球跌落

空心钢球自由下落到刚性面并反弹（见图 15-32），采用面-面接触模型求解钢球的动力学响应。已知条件如下：

1）空心钢球内径为 14mm，外径为 20mm，厚度为 3mm，球心距刚性面 50mm。

2）刚性面尺寸为 100mm×100mm。

3）钢球材料特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

4）假设钢球与刚性面为无摩擦接触，给定 BETA 阻尼为 1×10^{-5}。

5）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 网格划分

本例的几何模型较简单，可直接利用 HyperMesh 建立几何模型，再划分网格。

1）利用 Geom 页面中的 nodes 面板，创建 5 个临时节点，代表刚性面的 4 个角节点和钢球的球心，坐标分别为（0，0，0）、（100，0，0）、（0，100，0）、（100，100，0）和（50，50，50）。

2）利用 Geom 页面中的 surfaces 面板，创建球面，球心坐标为（50，50，50），球半径为 8.5mm，并将几何放置于 Ball 组件集。

3）利用 2D 页面中的 ruled 面板，利用 4 个角节点创建一个四边形单元（刚性面只需要一个单元），并放置于 Rigid_plate 组件集。

4）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将球面划分为 96 个高阶四边形网格，并将其放置于 Ball 组件集。

5）利用 Geom 页面中的 temp nodes 面板，清除临时节点。钢球跌落的有限元模型如图 15-33 所示。

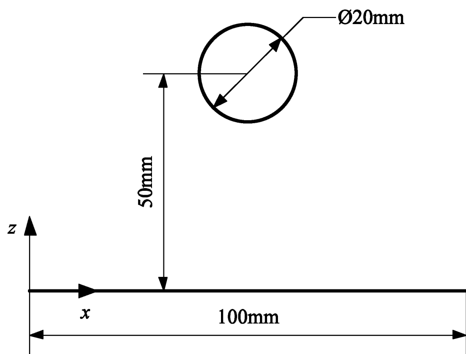


图 15-32 钢球跌落的示意图

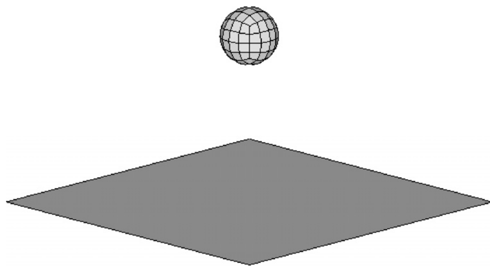


图 15-33 钢球跌落的有限元模型

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。为准确模拟曲面边界，钢球选用高阶板壳单元 SHELL281，并保持默认单元选项。

STEP 3 定义板壳截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Plate，Section type 改为 SHELL，如图 15-34 所示。单击 Create/Edit 按钮，弹出板壳横截面设置卡片。设置 PLIES=1，表示单层板壳。设置 TK=3，定义板壳的厚度为 3mm。设置 NUMPT（1）=3，定义沿板壳厚度方向的积分点个数为 3，这是 ANSYS 的默认值，如图 15-35 所示。最后单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

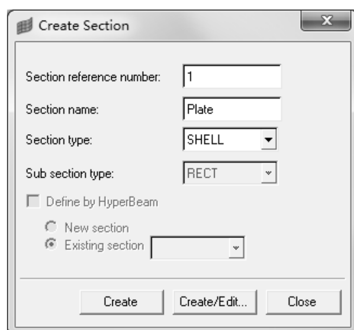


图 15-34　Create Section 对话框

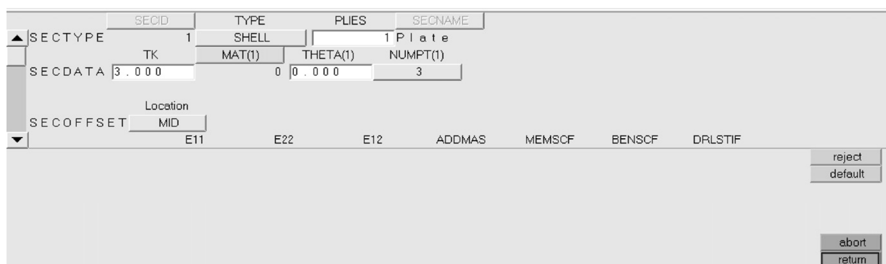


图 15-35　板壳横截面设置卡片

3）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

4）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 4 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为钢球定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3，密度 DENS 为 7.85E-9ton/mm^3，摩擦系数 MU 为 0。

STEP 5 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 Ball 组件集赋予单元、横截面和材料。

STEP 6 创建接触对

本例需要创建面-面接触对，第 15.4 节给出了创建面-面接触对的详细过程，这里需要注意以下几点：

1）目标面应选择 Rigid_plate 组件集，接触面应选择 Ball 组件集。

2）保持目标单元 TARGE170 的默认单元选项，ANSYS 将自动约束刚性目标面的所有自由度。

3）对于接触单元 CONTA174，利用接触向导设置 keyopt（7）=4（满足接触界面的动量和能量守恒），keyopt（10）=2（允许 ANSYS 自动更新接触刚度），keyopt（11）=1（包含板壳厚度效应），其余选项保持默认设置。

4）保持实常数的默认设置。

5）检查接触单元和目标单元的法向是否相对，若不相对，则需要调整。

6）HyperMesh 接触向导将目标单元 TARGE170（一个）放置于 TARGE170_4 组件集，接触单元 CONTA174（96 个）放置于 CONTA174_6 组件集。

STEP 7 边界条件定义

利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 15-32 中钢球的最高点的 UX、UY、ROTX、ROTY、ROTZ 自由度，即勾选 dof1、dof2、dof4、dof5、dof6，并将约束载荷放置于 constraints 载荷集。对钢球施加位移约束的目的是控制钢球只沿竖直方向（*Z* 方向）运动。

注意：不对刚性目标单元 TARGE170 施加任何自由度约束，通过设置 K2=0（默认），ANSYS 将自动约束刚性目标单元的所有自由度。

STEP 8 创建载荷步 1

载荷步 1 用于建立初始条件，施加重力加速度。尽管 HyperMesh 为 ANSYS 提供了部分用于瞬态动力学分析的控制卡片，但它并不便于为瞬态动力学分析设置合适的载荷步。以下借助 ANSYS 界面完成瞬态动力学分析。

1）利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Dropping_ball_1.cdb 文件，再利用 ANSYS 打开 Dropping_ball_1.cdb 文件。

注意：只需导出 Ball、TARGE170_4、CONTA174_6 组件集和 constraints 载荷集，而不导出 Rigid_plate 组件集。刚性目标面由刚性单元 TARGE170（位于 TARGE170_4 组件集）直接构成，而不需要下伏单元（位于 Rigid_plate 组件集）。

2）设置积分时间步长之前，应开启非线性求解控制选项，输入下列命令：

```
/SOLU
SOLCONTROL,ON,ON
```

3）定义新的分析类型为瞬态动力学分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis。如图 15-36 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分析类型。

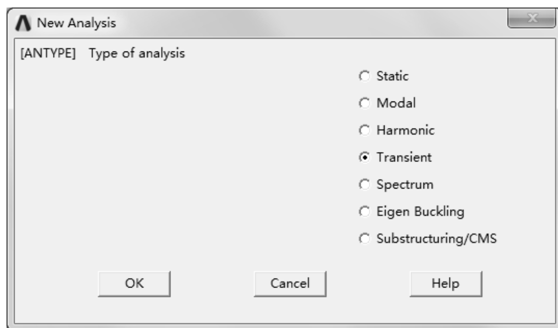


图 15-36 定义新的分析类型为 Transient

4）单击图 15-36 中的 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，保持默认设置，即完全法，单击 OK 按钮，如图 15-37 所示。

5）设置瞬态动力学分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中开启大变形效应，设置求解结束时间为 1E-6s，开启自动时间步长控制，设置载荷子步为 2，最大载荷子步为 2，最小载荷子步为 2，指定写入结果文件的项目为 Nodal DOF Solution，Nodal Reaction Loads，Nodal Velocity，Nodal Acceleration，Element Solution，以节省硬盘空间，写入频率为每个子步，如图 15-38 所示。在 Transient 选项卡中开启时间积分效应，采用阶跃载荷加载，设置阻尼系数 BETA=1E-5，如图 15-39 所示。

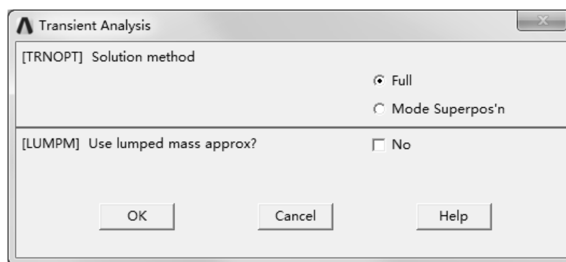


图 15-37 Transient Analysis 对话框

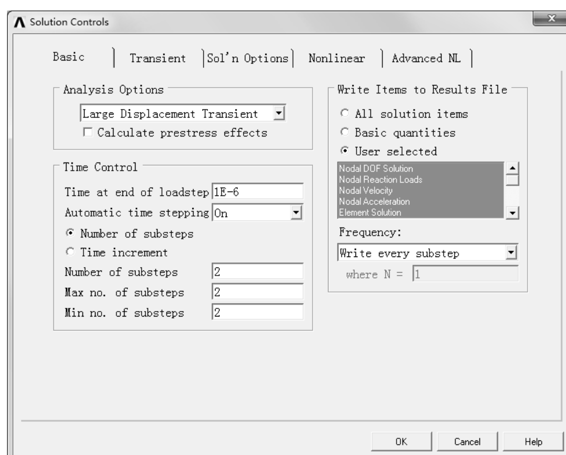


图 15-38 Solution Controls 对话框-Basic 选项卡

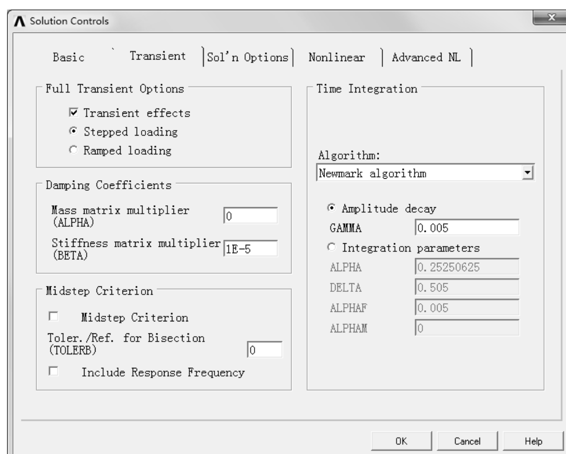


图 15-39 Solution Controls 对话框-Transient 选项卡

说明：为了施加初始加速度，需要在小的时间间隔内指定要加的加速度，详见第 10.4.3 节。

6）施加重力加速度，大小为 9800mm/s^2，方向为 *Z* 方向，ANSYS 将其考虑为惯性力（-*Z* 方向），可使用命令：

```
ACEL,0,0,9800
```

7）写出载荷步 1，输入命令：

```
LSWRITE,1
```



STEP 9 创建载荷步 2

载荷步 2 及后继载荷步用于求解钢球自由下落并与刚性面的碰撞过程。相对于整个分析时间，碰撞过程十分短暂。为了捕捉到碰撞瞬间，同时减少计算量，本例采用多载荷步进行分析。通过试算，可以确定第一次碰撞和第二次碰撞的时刻，从而帮助设置合适的载荷步。载荷步2用于求解从钢球下落到第一次与刚性面碰撞之前的过程，时间范围为1E-6～0.0904s。

1）设置瞬态动力学分析求解选项。利用 Solution Controls 对话框（见图 15-38）设置求解结束时间为 0.090 4s，设置时间步长为 0.002s，最小时间步长为 0.002s，最大时间步长为 0.002s，其余设置保持不变。

2）写出载荷步 2，输入命令：

```
LSWRITE,2
```

STEP 10 创建载荷步 3

载荷步 3 用于求解钢球第一次与刚性面碰撞的过程，时间范围为 0.090 4~0.090 7s。

1）设置瞬态动力学分析求解选项。利用 Solution Controls 对话框（见图 15-38）设置求解结束时间为 0.090 7s，设置时间步长为 2E-6s，最小时间步长为 1E-6s，最大时间步长为 2E-6s，其余设置保持不变。

2）写出载荷步 3，输入命令：

```
LSWRITE,3
```

STEP 11 创建载荷步 4

载荷步 4 用于求解钢球第一次与刚性面碰撞后到第二次与刚性面碰撞前的过程，时间范围为 0.090 7～0.261 5s。

1）设置瞬态动力学分析求解选项。利用 Solution Controls 对话框（见图 15-38）设置求解结束时间为 0.261 5s，设置时间步长为 0.002s，最小时间步长为 0.002s，最大时间步长为 0.002s，其余设置保持不变。

2）写出载荷步 4，输入命令：

```
LSWRITE,4
```

STEP 12 创建载荷步 5

载荷步 5 用于求解钢球第二次与刚性面碰撞的过程，时间范围为 0.261 5～0.261 8s。

1）设置瞬态动力学分析求解选项。利用 Solution Controls 对话框（见图 15-38）设置求解结束时间为 0.261 8s，设置时间步长为 2E-6s，最小时间步长为 1E-6s，最大时间步长为 2E-6s，其余设置保持不变。

2）写出载荷步 5，输入命令：

```
LSWRITE,5
```

STEP 13 创建载荷步 6

载荷步 6 用于求解钢球第二次与刚性面碰撞之后的过程，时间范围为 0.261 8～0.3s。

1）设置瞬态动力学分析求解选项。利用 Solution Controls 对话框（见图 15-38）设置求解结束时间为 0.3s，设置时间步长为 0.002s，最小时间步长为 0.002s，最大时间步长为 0.002s，其余设置保持不变。

2）写出载荷步 6，输入命令：

```
LSWRITE,6
```

STEP 14 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
LSSOLVE,1,6,1
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→From LS Files

1）进入时间历程后处理器 POST26，读取钢球最低点的 *Z* 方向位移、*Z* 方向速度、*Z* 方向加速度和 von Mises 应力结果，并绘制时间历程曲线，如图 15-40～图 15-45 所示。

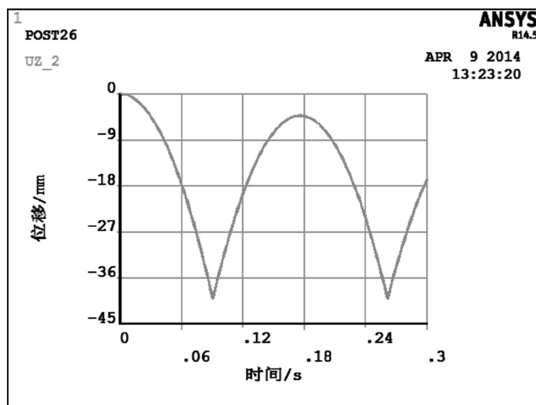


图 15-40 钢球最低点的 *Z* 方向位移-时间曲线 1

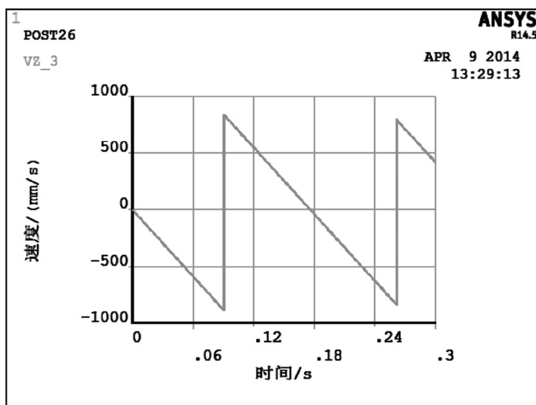


图 15-41 钢球最低点的 *Z* 方向速度-时间曲线 2

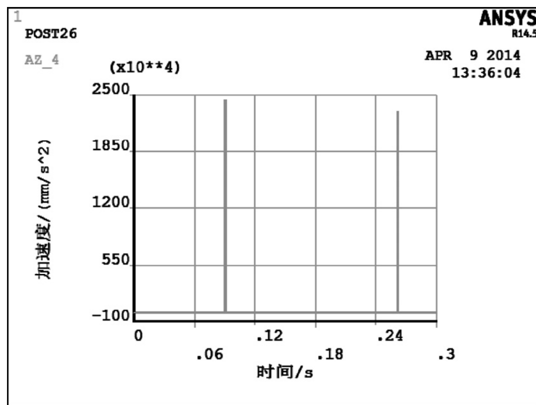


图 15-42 钢球最低点的 *Z* 方向加速度-时间曲线 3

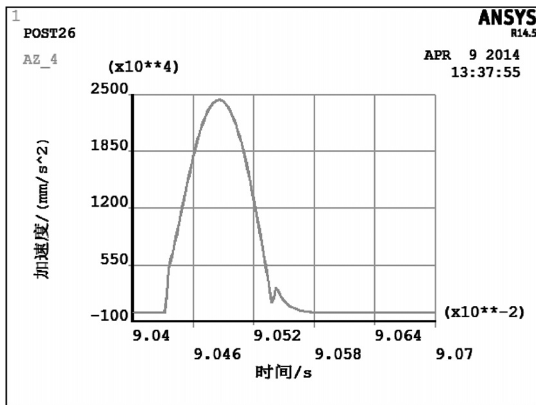


图 15-43 钢球最低点的 *Z* 方向加速度-时间曲线 4

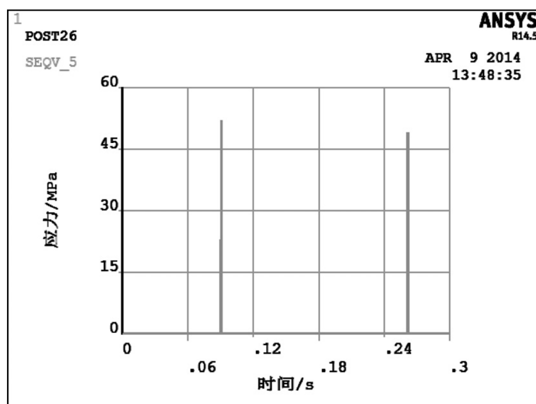


图 15-44 钢球最低点的 von Mises 应力-时间曲线 1

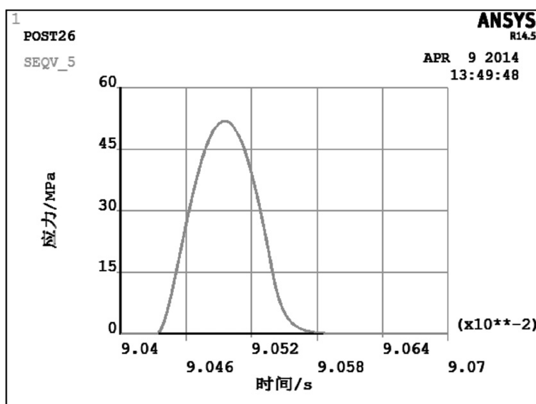


图 15-45 钢球最低点的 von Mises 应力-时间曲线 2

由图 15-40～图 15-45 可知，钢球在 0.3s 内与刚性面碰撞了两次，在碰撞瞬间，速度发生了突变，产生了非常大的加速度（最大约为 2488G，G 为重力加速度）。图 15-43 为第一次碰撞过程中，钢球最低点的 *Z* 方向加速度-时间曲线，可见碰撞时间非常短，小于 0.3ms。图 15-45 为第一次碰撞过程中，钢球最低点的 von Mises 应力-时间曲线，可知最大 von Mises 应力约为 52MPa。

2）进入通用后处理器 POST1，读取 TIME=0.090 496 的结果，查看钢球第一次撞击刚性面的 von Mises 应力结果，如图 15-46 所示。

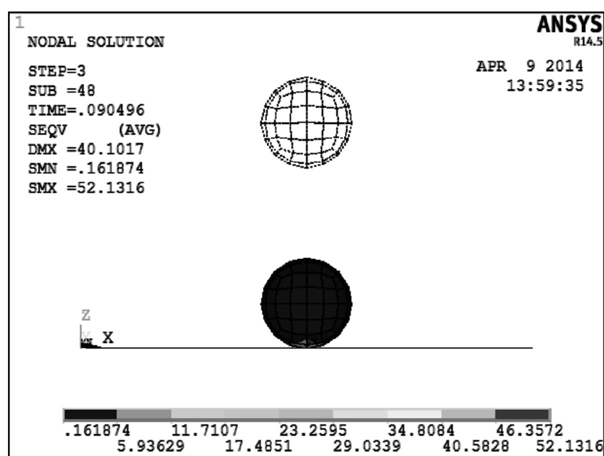


图 15-46 钢球第一次撞击刚性面的 von Mises 应力云图

由图 15-46 可知，最大应力点为钢球的最低点，即与刚性面的撞击点，最大 von Mises 应力为 52.131 6MPa。

15.5 接触非线性分析实例 3：钢球跌落

采用点-面接触模型对第 15.5 节的实例进行分析。本例仅介绍与第 15.5 节不同的点-面接触建模及其计算结果，其余分析过程与第 15.4 节完全相同。

STEP 1 网格划分

第 15.5 节将球面划分为 96 个高阶四边形网格，本例将球面划分为 240 个低阶四边形网格，如图 15-47 所示。

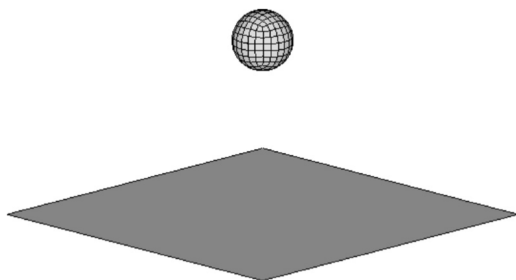


图 15-47 钢球跌落的有限元模型

注意：本例将采用接触点单元 CONTA175，应避免使用高阶下伏单元，故将钢球划分为密度稍大的低阶四边形网格。

STEP 2 单元定义

利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。钢球选用板壳单元 SHELL181，并设置单元选项 K3=2（Full w/ Incompatible），采用非协调模式的完全积分方法，以提高计算精度。

STEP 3 创建接触对

创建点-面接触对与创建面-面接触对的方法基本相同，详见第 15.3 节，这里需要注意以下几点：

1）在 Create New Contact Pair 对话框中，将 Creation method 设置为 Flexible，Contact type 设置为 3D，Create from 设置为 Point to surface，Symmetric Contact 设置为 No，如图 15-48 所示。

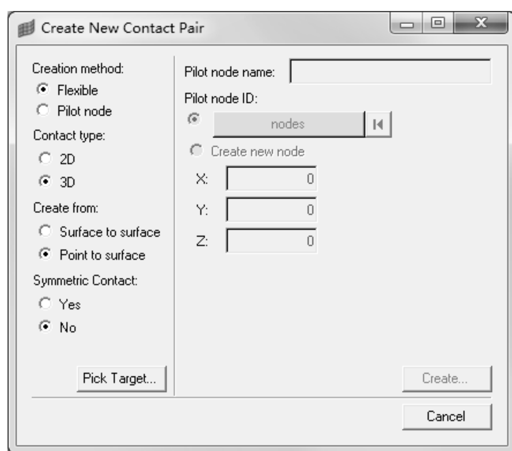


图 15-48 Create New Contact Pair 对话框

2）目标面应选择 Rigid_plate 组件集，接触面应选择 Ball 组件集。

3）保持目标单元 TARGE170 的默认单元选项，ANSYS 将自动约束刚性目标面的所有自由度。

4）对于接触单元 CONTA175，利用接触向导设置 keyopt（7）=4（满足接触界面的动量和能量守恒），keyopt（10）=2（允许 ANSYS 自动更新接触刚度），keyopt（11）=1（包含板壳厚度效应），其余选项保持默认设置。

5）保持实常数的默认设置。

6）对于点-面接触，HyperMesh 无法利用接触向导检查单元法向。在创建点-面接触对之后，应利用 Tool 页面中的 normals 面板，检查目标单元法向，必须保证目标单元法向指向接触单元。

7）HyperMesh 接触向导将目标单元 TARGE170（一个）放置于 TARGE170_4 组件集，接触单元 CONTA175（位于钢球单元角节点，共 242 个）放置于 CONTA175_5 组件集。

STEP 4 创建载荷步

通过试算，可以确定第一次碰撞和第二次碰撞的时刻，从而帮助设置合适的载荷步。与第 15.5 节相同，本例采用 6 个载荷步完成分析。载荷步 1 的时间范围为 0～1E-6s，载荷步 2 的时间范围为 1E-6～0.090 3s，载荷步 3 的时间范围为 0.090 3～0.090 6s，载荷步 4 的时间范围为 0.090 6～0.246 7s，载荷步 5 的时间范围为 0.246 7～0.247 0s，载荷步 6 的时间范围为 0.247 0～0.3s。

STEP 5 查看结果

1）进入时间历程后处理器 POST26，读取钢球最低点的 *Z* 方向位移、*Z* 方向速度、*Z* 方向加速度和 von Mises 应力结果，并绘制时间历程曲线，如图 15-49～图 15-54 所示。

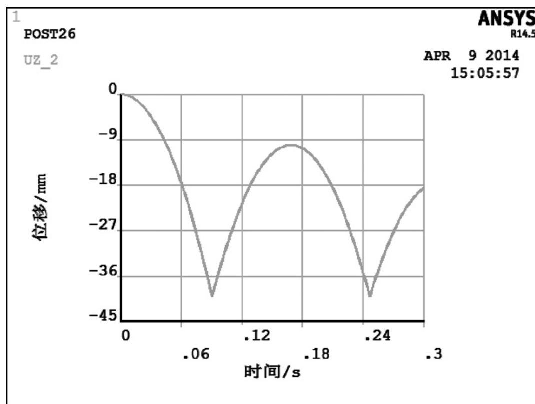


图 15-49　钢球最低点的 *Z* 方向位移-时间曲线 1

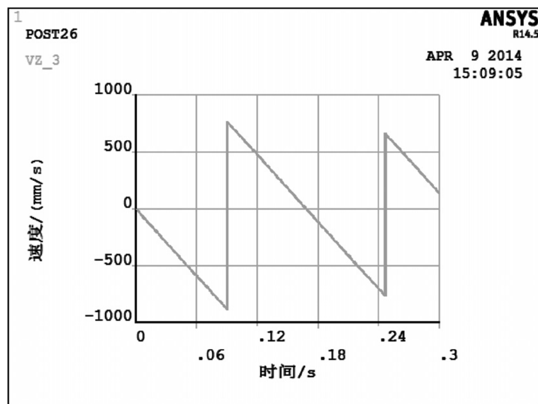
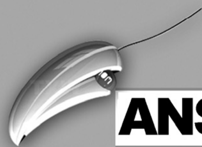


图 15-50　钢球最低点的 *Z* 方向速度-时间曲线 2

由图 15-49～图 15-54 可知，钢球在 0.3s 内与刚性面碰撞了两次，在碰撞瞬间，速度发生了突变，产生了非常大的加速度（最大约为 3531G，G 为重力加速度）。图 15-52 为第一次碰撞过程中，钢球最低点的 *Z* 方向加速度-时间曲线，可见碰撞时间非常短，小于 0.3ms。图 15-54 为第一次碰撞过程中，钢球最低点的 von Mises 应力-时间曲线，可知最大 von Mises 应力约为 90MPa。

由于单元形式、单元密度以及接触探测点的位置不同，点-面接触模型与面-面接触模型的计算结果略有不同。数据对比发现，点-面接触模型预测的碰撞时刻相比面-面接触模型稍微提前，这是因为点-面接触模型使用角节点作为接触探测点，而面-面接触模型使用 Gauss 积分点（位于单元表面内部）作为接触探测点。



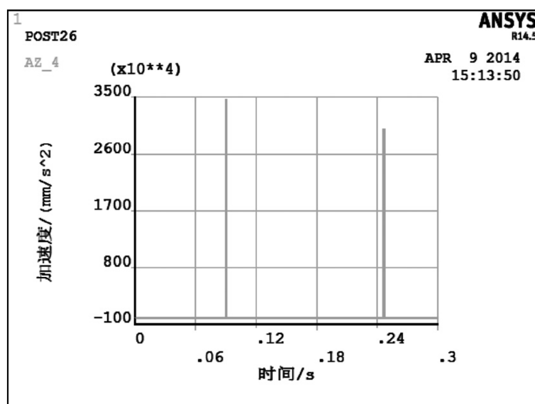


图 15-51　钢球最低点的 *Z* 方向加速度-时间曲线 3

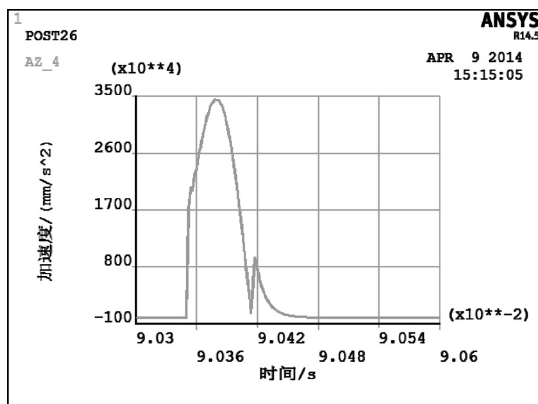


图 15-52　钢球最低点的 *Z* 方向加速度-时间曲线 4

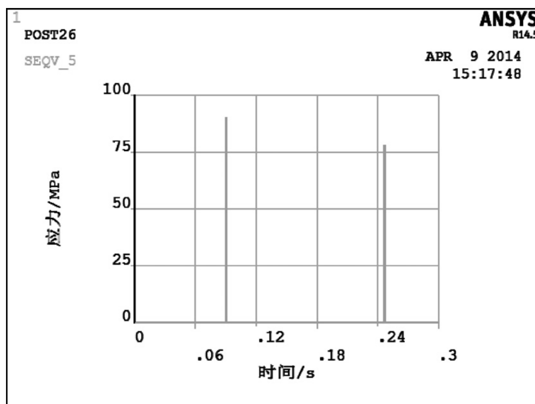


图 15-53　钢球最低点的 von Mises 应力-时间曲线 1

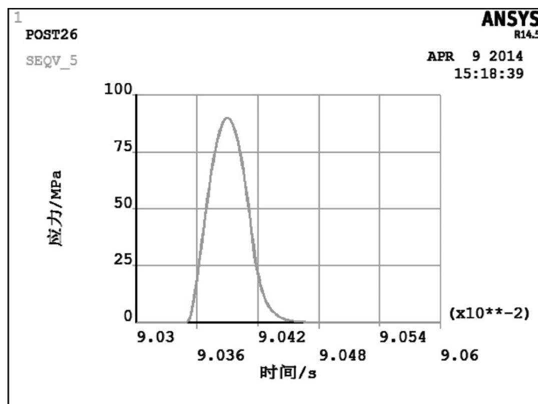


图 15-54　钢球最低点的 von Mises 应力-时间曲线 2

2）进入通用后处理器 POST1，读取 TIME=0.090 39 的结果，查看钢球第一次撞击刚性面的 von Mises 应力结果，如图 15-55 所示。

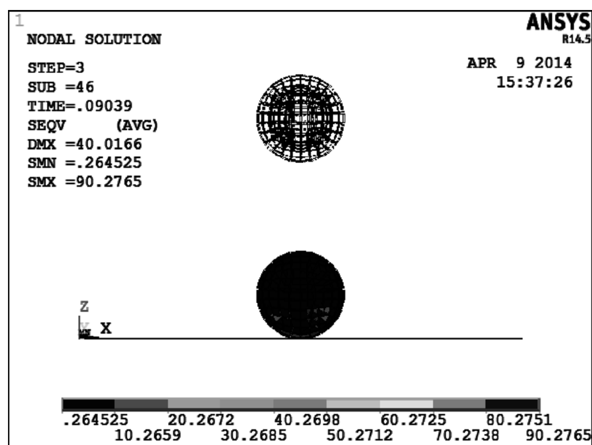


图 15-55　钢球第一次撞击刚性面的 von Mises 应力云图

由图 15-55 可知，最大应力点为钢球的最低点，即与刚性面的撞击点，最大 von Mises 应力为 90.276 5MPa。

15.6 接触非线性分析实例 4：螺栓预紧

图 15-56 为螺栓连接示意图（几何单位为 mm），分析结构在螺栓预紧力作用下的应力分布。已知条件如下：

1）螺栓预紧力为 10 000N。

2）所有的材料均为钢，其特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3。

3）接触面的摩擦系数为 0.15。

4）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

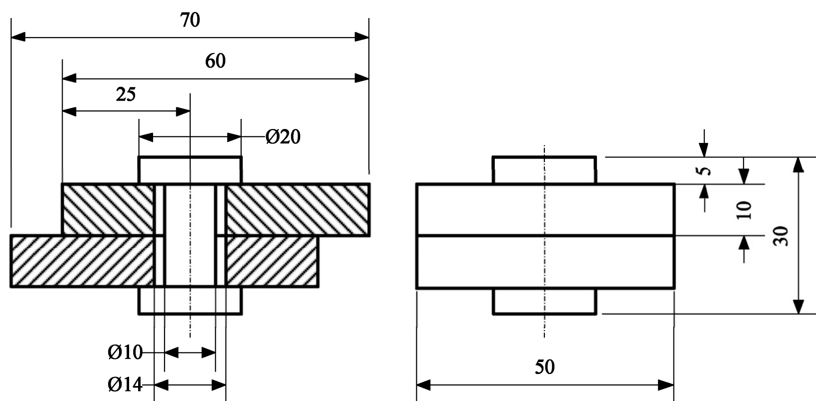


图 15-56 螺栓连接示意图

STEP 1 网格划分

1）由于模型及载荷具有对称性，利用 CAD 软件建立螺栓连接的 1/2 几何模型，并导入 HyperMesh，如图 15-57 所示。

2）利用 Geom 页面中的 solid edit 面板，将几何体切分为图 15-57 所示的小块，这是为了方便划分六面体网格。需要注意的是，应将螺栓切分为上、下两部分，以方便插入预紧力单元。

3）利用 2D 页面中的 automesh 面板，将上法兰的顶面划分为 165 个高阶四边形单元，并放置于 Geometry_flange_up 组件集；将下法兰的底面划分为 165 个高阶四边形单元，并放置于 Geometry_flange_down 组件集，将上部螺母的底面划分为 217 个高阶四边形单元，并放置于 Geometry_bolt 组件集，如图 15-57 所示。

4）利用 3D 页面中的 solid map 面板，将上法兰划分为 660 个高阶六面体单元，并放置于 flange_up 组件集；将下法兰划分为 660 个高阶六面体单元，并放置于 flange_down 组件集；将上部螺栓划分为 244 个高阶六面体网格，并放置于 bolt_up 组件集。

5）利用 Tool 页面中的 reflect 面板，将上部螺栓单元复制一份，再镜像到下部螺栓位置（这样可确保网格在交界面重合，但不耦合），并放置于 bolt_down 组件集，如图 15-58 所示。

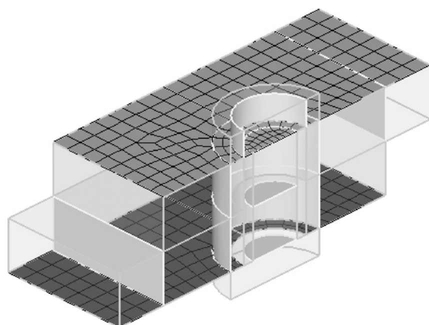


图 15-57　螺栓连接的 1/2 几何模型

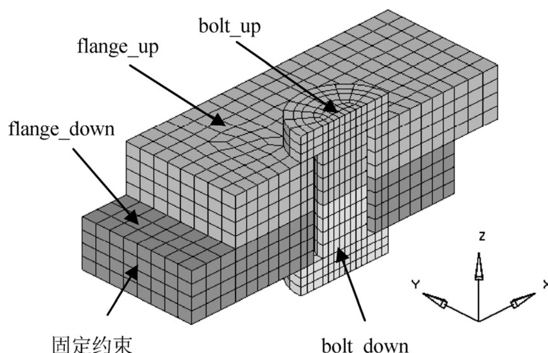


图 15-58　螺栓连接的 1/2 有限元模型

注意：4 个组件集中的网格相互独立，交界面节点重合，但不耦合。

6）利用 1D 页面中的 spotweld 面板（见图 15-59）生成预紧力单元，并将其放置于 pretension 组件集。indep 选择 bolt_down 中与 bolt_up 交界的所有节点（共 85 个，用于定义节点 *I*），dep 选择 bolt_up 中与 bolt_down 交界的所有节点（共 85 个，用于定义节点 *J*），element config 选择 bar2，search tolerance 设置为 0.2，单击 Create 按钮即生成 85 个预紧力单元。

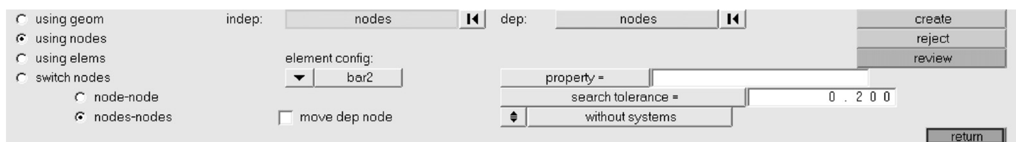


图 15-59　利用 spotweld 面板生成预紧力单元

7）利用 1D 页面中的 bars 面板（见图 15-60）指定预紧力单元的预紧节点 *K*，选择所有的预紧力单元，direction node 选择预先创建的编号为 9959 的节点（任意位置，但应是孤立节点），单击 update 按钮，将所有预紧力单元指定共同的预紧节点 *K*。

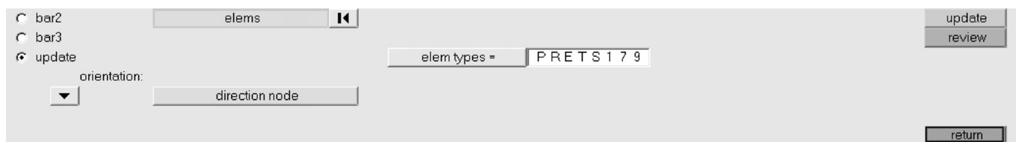


图 15-60　利用 bars 面板指定预紧力单元的预紧节点 *K*

注意：预紧力单元的详细描述详见第 2.8 节。按照步骤 6）和 7）生成的预紧力单元，节点 *I* 位于 bolt_down，形成表面 *A*，节点 *J* 位于 bolt_up，形成表面 *B*。

STEP 2 单元定义

1）利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。螺栓和法兰为高阶六面体单元，选用 SOLID186 单元，并设置单元选项 K2=1（Full Integration），选用完全积分方法。

2）预紧力单元选用 PRETS179，无需定义单元选项。

STEP 3 定义预紧截面

预紧截面用于定义预紧力的方向，它定义了预紧力相对表面 *A* 的方向。

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section reference number 为 1，Section name 为 Bolt，Section type 选择 PRETENSION，如图 15-61 所示。

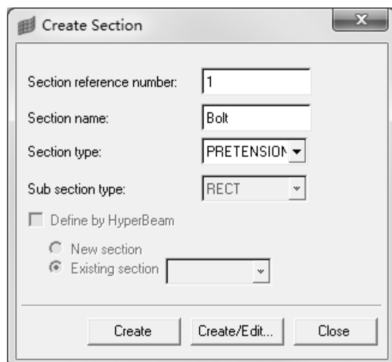


图 15-61 Create Section 对话框

3）单击 Create/Edit 按钮，弹出截面数据设置卡片（见图 15-62），设置 NODE 编号为 9959（预紧节点 *K*），NX=0，NY=0，NZ=1。NX、NY、NZ 定义的方向矢量就代表预紧力的方向，此时为+*Z* 方向。

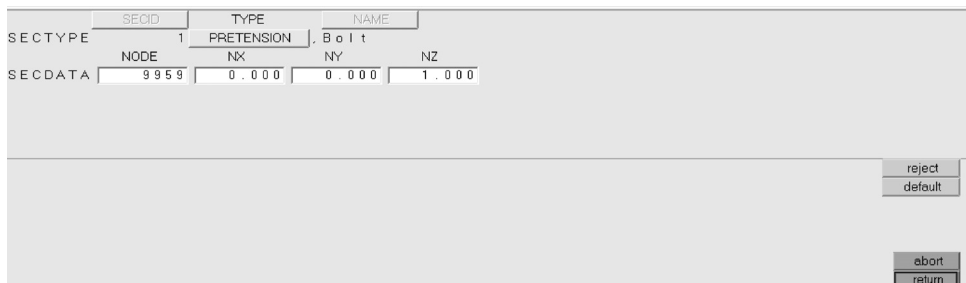


图 15-62 定义预紧截面数据

4）单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

5）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

6）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 4 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为螺栓和法兰定义材料，所有材料均为钢，杨氏模量 EX 为 2.1E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3，摩擦系数 MU 为 0.15。

STEP 5 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 flange_up 组件集、flange_down 组件集、bolt_up 组件集、bolt_down 组件集、pretension 组件集赋予相应的单元、横截面和材料。

STEP 6 创建接触对

本例需要创建 3 对面-面接触对，分别是 flange_up 与 flange_down 接触对、 bolt_up 的螺母与 flange_up 接触对、bolt_down 的螺母与 flange_down 接触对。螺杆与法兰孔的间距为 2mm，

无需接触对。第 15.3 节给出了创建面-面接触对的详细过程，这里需要注意以下几点：

1）对于每对接触对，目标面和接触面的选择并不重要。

2）对于目标单元 TARGE170，保持默认单元选项。

3）对于接触单元 CONTA174，利用接触向导设置 keyopt（5）=1（忽略接触对的初始间隙），keyopt（9）=1（忽略接触对的初始穿透或间隙），keyopt（10）=2（允许 ANSYS 自动更新接触刚度），其余选项保持默认设置。

4）保持实常数的默认设置。

5）检查接触单元和目标单元的法向是否相对，若不相对，则需要调整。

6）对于每对接触对，HyperMesh 接触向导将目标单元和接触单元分别放置于不同的组件集，以方便管理。

STEP 7 边界条件定义

1）利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束图 15-58 中“固定约束”面的所有节点的 UX、UY、UZ 自由度，即勾选 dof1、dof2、dof3，并将约束载荷放置于 constraints_fixed 载荷集。

2）约束图 15-58 中法兰与螺栓剖截面所有节点的 UY 自由度，即勾选 dof2，并将约束载荷放置于 constraints_y 载荷集。

STEP 8 施加预紧力

预紧载荷可用 SLOAD 命令施加。

1）在 Analysis 页面中选择 control cards 面板。

2）单击 SLOAD 按钮。设置 SECID 为 1，PINLAB 为 PL01，KINIT 为 TINY，KFD 为 FORC，FDVALUE 为 5000，LSLOAD 为 1，LSLOCK 为 2，如图 15-63 所示。

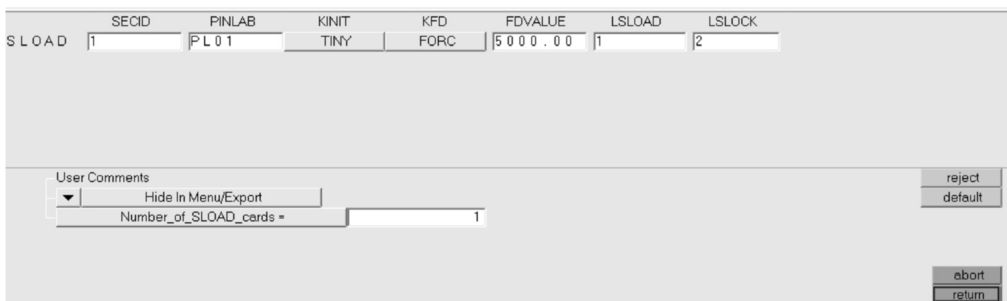


图 15-63　SLOAD 命令

3）单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

说明：① 可以利用 SLOAD 卡片设置多个螺栓预紧力，预紧力的个数由 Number_of SLOAD_cards 控制。本例只有一个螺栓预紧力，所以设置 Number_of SLOAD_cards 为 1。

② SECID 指定要施加预紧力的预紧截面编号，本例为 1。

③ PLNLAB 用于指定预紧力的施加顺序，可以利用 PL01～PL99 控制螺栓预紧力的加载过程。本例只有一个螺栓预紧力，且预紧之后保持不变，应设置 PINLAB 为 PL01。

④ KINIT 用于指定预紧力 PL01 的初始作用效果，TINY 是指在施加完全的预紧力之前，先使用 0.1%的预紧力载荷，这样有助于加强收敛。

⑤ KFD 用于指定预紧载荷的形式，可以为力或者位移，本例为力，即 FORC。

⑥ FDVALUE 指定预紧力的大小，对于 1/2 模型，只需施加一半的预紧力，即 5000N。

⑦ LSLOAD 指定将预紧力施加到哪个载荷步，本例施加到第 1 个载荷步。

⑧ LSLOCK 指定在哪个载荷步锁定由预紧力引起的位移，以便在后续载荷步中可以考虑预紧载荷。本例在第 2 个载荷步锁定位移。

STEP 9 求解控制

1）单击/SOLU 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。/SOLU 命令的作用是退出 ANSYS 前处理器/PREP7，进入 ANSYS 求解器。

2）单击 ANTYPE 按钮，保持默认设置（见图 15-64），STATIC 表示进行静力分析。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

3）单击 AUTOTS 按钮，将 Key 由 OFF 切换为 ON（见图 15-65），表示开启自动时间步长控制。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。

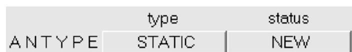


图 15-64 ANTYPE 命令



图 15-65 AUTOTS 命令

4）单击 NSUBST 按钮，将 NSBSTP 设置为 10，NSBMX 设置为 100，NSBMN 设置为 5（见图 15-66），表示设置载荷子步为 10，最大载荷子步为 100，最小载荷子步为 5。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



图 15-66 NSUBST 命令

5）单击 OUTRES 按钮，将 FREQ 设置为 ALL（见图 15-67），表示将所有求解数据写入结果文件，写入频率为每个子步。单击 return 按钮，返回 control cards 面板。



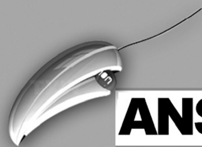
图 15-67 OUTRES 命令

6）在 control cards 面板中，单击 next 按钮，切换到下一个页面。单击 SOLVE 按钮，并单击 return 按钮，返回 control cards 面板。SOLVE 命令的作用是发出求解命令。

7）当前的控制卡片如图 15-68 和图 15-69 所示，带深灰底的命令将导入 ANSYS。单击 return 按钮，退出 control cards 面板。

AUTOTS	ETABLE	OUTRES	MODOPT	LUMPM	DOMEGA	CRPLIM	delete
/BATCH	KBC	/POST1	MXPAND	ACEL	IRLF	NCNV	disable
BFUNIF	LNSRCH	PRESOL	EQSLV	CGLOC	OMEGA	ERESX	enable
/COM	MODE	RSYS	ALPHAD	CGOMGA	TIMINT	SLOAD	
CNVTOL	NEQIT	/SOLU	BETAD	CMDOMEGA	PRED	/TITLE	next
DELTIM	NLGEOM	SOLU	PSTRES	CMOMEGA	KUSE	/STITLE	
DOF	NSUBST	ANTYPE	EXPASS	DCGOMG	DMPRAT	TIME	return

图 15-68 控制卡片 1



TOTAL	/DELETE	TINTP	SUBOPT	SOLVE	delete
TREF	HARFRQ	TRNOPT	EMUNIT	LSSOLVE	disable
TUNIF	HREXP	ARCLEN	EORIENT		enable
TOFFST	HROPT	ARCTRM	UNSU_PREP7		
/SYS	HROUT	BUCOPT	UNSU_END		
/ASSIGN	LVSCALE	NROPT	/UNITS		prev
/COPY	MDAMP	SSTIF	NUMOFF		return

图 15-69 控制卡片 2

HyperMesh 按固定格式输出控制卡片中的求解命令，控制卡片的操作顺序不影响输出文件。第 8 步和第 9 步共添加了 7 项 ANSYS 求解命令：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC,NEW
AUTOTS,ON
NSUBST,10,100,5
OUTRES,ALL,ALL
SLOAD,1,PL01,TINY,FORC,5000,1,2
SOLVE
```

STEP 10 求解并查看结果

利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 Pretension_bolt_static.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 Pretension_bolt_static.cdb 文件，并自动进行非线性求解。

进入通用后处理器 POST1，读取最后子步的结果，查看螺栓连接结构的应力云图，如图 15-70 和图 15-71 所示。

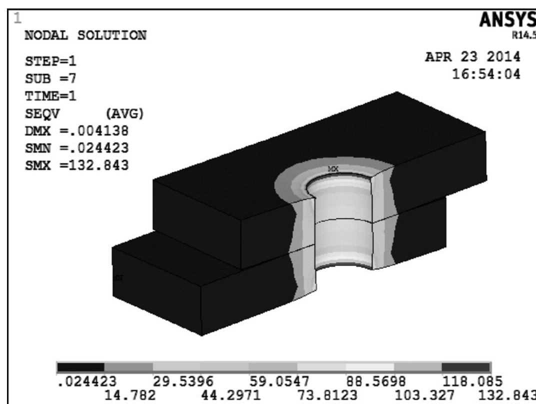


图 15-70 法兰的 von Mises 应力云图

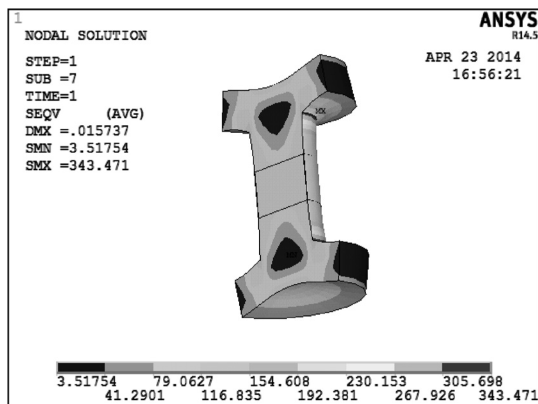


图 15-71 螺栓的 von Mises 应力云图

由图 15-70 可知，在 10 000N 的预紧力作用下，由于螺母的挤压和应力集中，法兰在螺栓孔的上、下边缘产生了比较大的应力，最大应力为 132.843MPa。

由图 15-71 可知，螺杆产生了更大的应力，由于应力集中，最大应力发生在螺母与螺杆的连接处，为 343.471MPa。这也进一步证实了在螺栓连接结构中，螺栓断裂是主要的失效形式。

15.7 本章小结

1）本章详细介绍了 4 个实例，涉及过盈配合、接触碰撞（面-面接触和点-面接触）和螺

栓预紧问题。除接触碰撞问题外（瞬态动力学分析），其余实例采用 HyperMesh 建立了有限元模型，并设置了所有的非线性求解选项。

2）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。



3）接触是一种高度非线性行为，ANSYS 的提供的面-面接触和点-面接触方法可以解决大多数的工程问题。

4）成功且准确求解接触问题的关键在于建立准确的接触模型、设置合适的单元选项和实常数。除此之外，也不应忽视求解控制。

第 16 章　多体刚-柔系统分析

多体分析用于确定由柔体或刚体组成的多体系统的动力学行为。多体系统广泛应用于工业产品，例如汽车、机器人、雷达伺服转台和空间探测器的可收展天线等。

早期的有限元分析技术主要解决单个零件的计算问题。近年来，有限元装配技术（第 4 章）解决了装配体的建模和分析问题。然而，有限元装配技术大都基于小变形理论，并不适合分析多体运动。另一方面，ADAMS 等多体系统仿真软件更适合多刚体分析。

ANSYS 采用有限元方法建立和求解多体系统。多体系统可全部由柔体或刚体组成，也可由刚体和柔体共同组成。与多刚体动力学仿真相比，ANSYS 的多体仿真方法不仅可获得各零部件的运动学信息，更可得到柔性体的应力、应变等关键数据，对于真实模拟多体系统动力学行为具有重要意义。

本章主要介绍了多体刚-柔系统分析的基本原理和关键技术，给出了利用 HyperMesh 进行 4 连杆机构动力学分析的前处理和求解控制的实例，并解释了分析结果。

16.1　多体刚-柔系统的建模技术

对于多体分析，最重要的是建立正确的分析模型。多体系统由柔体或刚体组成。因此，多体刚-柔系统模型包括柔体模型、刚体模型和连接模型。ANSYS 采用各类单元建立柔体或刚体的有限元模型，零部件之间的连接则采用支持大变形分析的 JOINT 单元或 MPC 算法。第 16.3 节给出了建立多体刚-柔系统模型的实例。

16.1.1　建立柔体模型

柔体模型可采用任意的三维实体单元、板壳单元和梁单元建立，建模方法不存在特殊性，本节不做详述。

16.1.2　建立刚体模型

刚体模型可采用 MPC184 刚性杆/梁单元或 TARGE170 刚性单元建立。关于 MPC184 刚性杆/梁单元的详细描述参见第 2.9 节。关于 TARGE170 单元的详细描述参见第 2.11 节。

若采用 TARGE170 单元建立刚体模型，需要注意以下几点：

1）刚体可由 TARGE170 单元直接构成，无需下伏单元。

2）不同的刚体须赋予不同的实常数号。

3）应设置单元选项 K2=1（Specified by user），由用户设置刚体的边界条件。

4）每个刚体须附加一个 PILOT 点单元（一种特殊的 TARGE170 单元），PILOT 单元与其所控制的刚体共享实常数号，以控制刚体的运动。需要注意的是，PILOT 点单元具有 6 个自由度，应将所有载荷和约束施加到 PILOT 点单元。

16.1.3 建立连接模型

连接模型可采用 MPC184 JOINT 单元或 MPC 多点约束算法建立。关于 MPC184 JOINT 单元的详细描述参见第 2.10 节。关于 MPC 多点约束算法的详细描述参见第 4.1.3 节。

注意：① MPC184 JOINT 单元的自由度使用局部坐标系定义。载荷和边界条件（命令为 FJ 和 DJ）是通过局部坐标系施加的，这些局部坐标系将跟随节点转动而转动。因此，MPC184 JOINT 单元特别适合用于多体分析。

② 在 MPC 算法（Force-Distributed Constraint）中，通过设置 K4，可以控制约束自由度。这里的自由度采用节点坐标系，尽管其原点将随着节点运动，但其方向不会随着多体运动而变化，即自由度方向始终保持为初始状态。

③ 应避免使用基于小变形理论的刚性区域（CERIG）、柔性连接（RBE3）、约束方程（CE）和自由度耦合（CP）。

16.2 多体刚-柔系统分析求解控制

一般地，多体系统分析属于瞬态动力学分析，且包含大转动和大位移等非线性特性。因此，不同于线性分析技术，多体分析需要消耗更多的计算资源。

ANSYS 基于问题的物理特性，将各种非线性分析参数自动设置为合适的值。对于多体分析，应使用多个子步求解，推荐开启自动时间步长控制。此外，还须在求解选项中开启大变形效应（NLGEOM,ON）。

16.3 多体刚-柔系统分析实例

图 16-1 为 4 连杆机构的示意图。4 杆均为铰链连接，曲柄由图示位置逆时针加速转动，求解机构的动力学响应。已知条件如下：

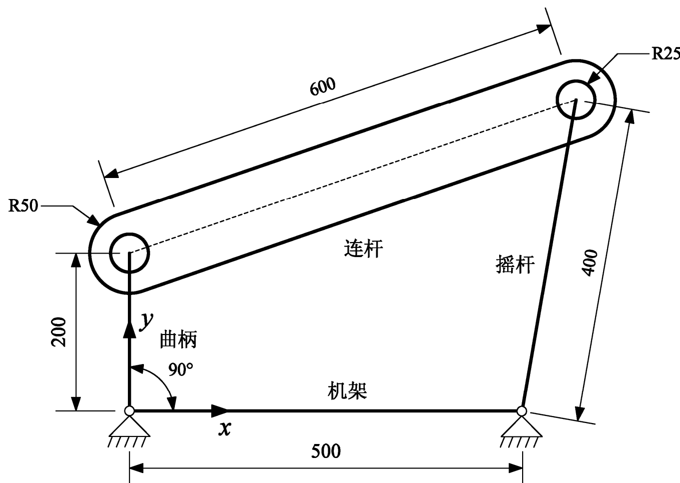


图 16-1　4 连杆机构的示意图

1）4 连杆机构的几何参数（单位为 mm）如图 16-1 所示，连杆厚度（*Z* 方向）为 40mm。

2）连杆材料为钢，其特性：杨氏模量为 210GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850kg/m^3。

3）曲柄、摇杆、机架考虑为刚体，且忽略质量。

4）曲柄由图示位置逆时针加速转动，角位移的时间历程为 $8\pi t^2$（单位为 rad），7850kg/m^3t 为时间。

5）给定 BETA 阻尼为 1×10^{-5}。

6）本例采用的单位制为 mm（长度）、N（力）、MPa（应力）、ton（质量）和 s（时间）。

STEP 1 网格划分

本例将综合利用实体单元、MPC184 刚性梁单元、TARGE170 刚性单元、MPC 算法和 MPC184 铰链单元进行建模，过程如下：

1）利用 CAD 软件建立连杆的三维模型，并导入 HyperMesh。

2）灵活运用 Geom 页面中的几何操作工具，对连杆进行切分，以便于划分高质量的六面体网格。

3）灵活运用 2D 和 3D 页面中的网格划分工具，将连杆划分为 308 个高阶六面体单元，并放置于 rod 组件集，如图 16-2 所示。

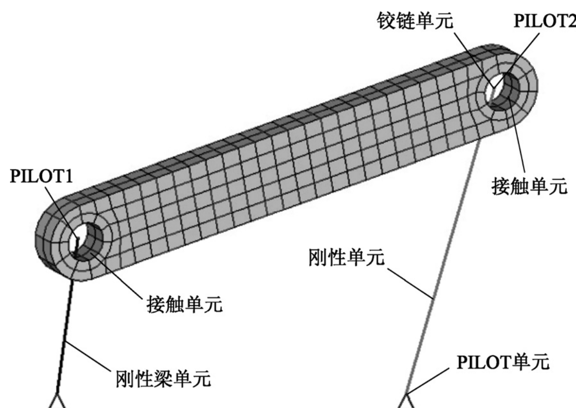


图 16-2　4 连杆机构的有限元模型（含边界条件）

4）灵活运用 Geom 页面中的 nodes 面板，创建曲柄和摇杆两端的节点（共 4 个），它们将被用于创建刚性单元。

5）利用 1D 页面中的 rods 面板（见图 16-3），通过曲柄两端的节点创建一个刚性梁单元（图 16-2 中的“刚性梁单元”），并放置于 crank 组件集。

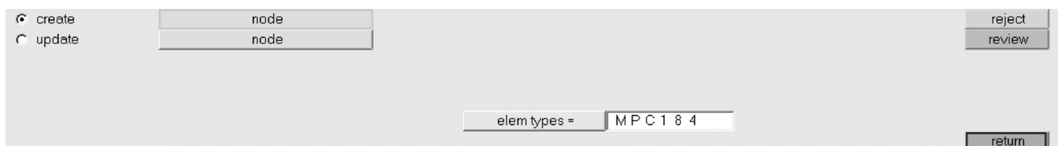


图 16-3　创建刚性梁单元-MPC184

6）利用 1D 页面中的 rods 面板（见图 16-4），通过摇杆两端的节点创建一个刚性单元（图 16-2 中的“刚性单元”），并放置于 rocker 组件集。

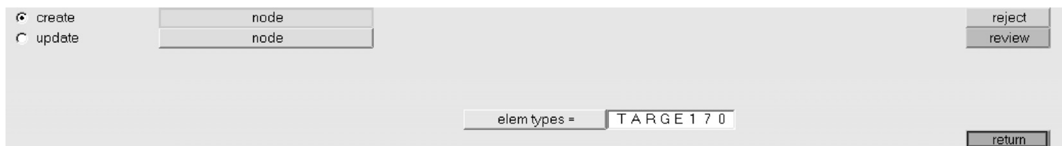


图 16-4　创建刚性单元-TARGE170

说明：HyperMesh 的网格划分工具具有很大的灵活性。例如，1D 页面中的 rods 面板不仅可以创建 LINK180 单元，也可以创建 MPC184 和 TARGE170 等由两个节点构成的线单元。

7）利用 1D 页面中的 masses 面板（见图 16-5），在摇杆底部节点创建一个 PILOT 点单元（图 16-2 中的“PILOT 单元”），并放置于 rocker 组件集。

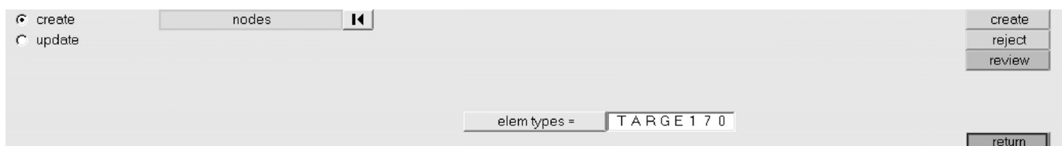


图 16-5　创建刚性单元-PILOT

8）利用 Card Edit 工具编辑 PILOT 点单元属性，修改 SHAPEFLG=99，如图 16-6 所示。

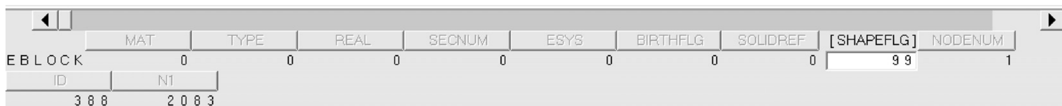


图 16-6　修改 PILOT 单元属性

说明：① 对于刚性单元 TARGE170，应附加一个 PILOT 点单元，用于控制刚体的自由度及运动，因此，应将它们放置于同一个组件集。

② 1D 页面中的 masses 面板不仅可以创建 MASS21 单元，也可以创建 PILOT、CONTA175 等点单元。

③ 若用直接法创建 PILOT 单元，还须修改单元属性 SHAPEFLG=99。

9）利用 Tool 页面中的 translate 面板，将图 16-2 中“刚性单元”的上部节点复制一份，用于创建铰链单元。

10）利用 1D 页面的 rods 面板（见图 16-3）在连杆与摇杆的交点创建一个铰链单元（图 16-2 中的“铰链单元”），并放置于 revolute 组件集。

说明：铰链单元的详细描述参见第 2.10 节。铰链单元由两个重合节点构成，*I* 节点选择图 16-2 中“刚性单元”的上部节点，*J* 节点选择步骤 9）创建的临时节点。应特别注意的是，这两个节点在空间重合但不能耦合。为方便选择重合节点，可勾选 coincident picking 复选框（Preferences→Graphics）。

STEP 2 单元定义

1）利用 Utility 选项卡中的 ET Type 按钮设定单元和单元选项。连杆为高阶六面体单元，选用 SOLID186 单元，并设置单元选项 K2=1（Full Integration），选用完全积分方法。

2）曲柄选用刚性梁单元 MPC184，设置单元选项 K1=1（Rigid beam），K2=1（Lagrange Multiplier）。

3）摇杆选用刚性单元 TARGE170，设置 K2=1，由用户控制 PILOT 单元的边界条件。

4）铰链选用铰链单元 MPC184，设置 K1=6（Revolute）。

注意：对于 MPC184 单元，不同版本的 HyperMesh 提供了不同的单元选项。例如，HyperMesh 11.0 可以设置 K1 和 K2，而 HyperMesh 12.0 只能设置 K1，必要时，需要在 ANSYS 前处理器中设置 K2。

STEP 3 设置实常数

利用 Utility 选项卡中的 Real Sets 按钮，为摇杆刚性单元 TARGE170 创建实常数，并设置所有实常数为 0。摇杆由 TARGE170 单元直接构成，实常数的设置并不影响计算结果。

STEP 4 创建局部坐标系

铰链单元的自由度使用局部坐标系定义，局部坐标系的 *X* 轴即是铰链单元的销轴。

1）利用 Tool 页面中的 translate 面板，将图 16-2 中“刚性单元”的上部节点复制一份，再沿 *Z* 方向平移 20mm。

2）将图 16-2 中“刚性单元”的上部节点复制一份，再沿 *X* 方向平移 20mm。

3）利用 Analysis 页面中的 systems 面板（见图 16-7），通过 3 个节点创建局部坐标系。origin node 为局部坐标系的原点，选择图 16-2 中“刚性单元”的上部节点，x-axis 为局部坐标系的 *X* 轴，选择步骤 1）创建的节点，xy-plane 定义局部坐标系的 *XY* 平面，选择步骤 2）创建的节点。创建的局部坐标系如图 16-8 所示。

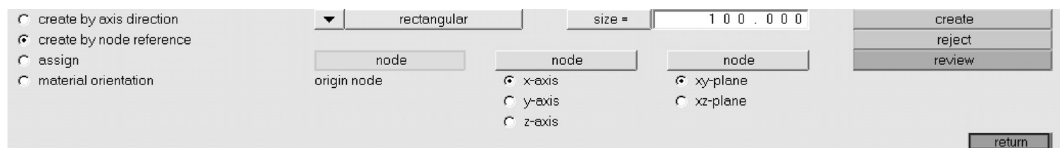


图 16-7　systems 面板

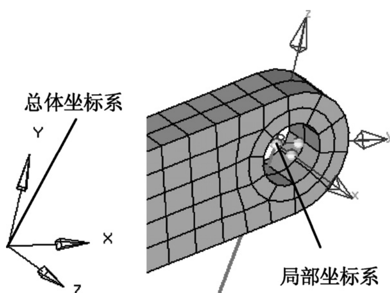


图 16-8　局部坐标系

4）利用 Geom 页面中的 temp nodes 面板，清除临时节点。

5）利用 Tool 页面中的 renumber 面板，修改局部坐标系编号为 11，如图 16-9 所示。ANSYS 规定局部坐标系的编号必须大于 10，因此还须将 HyperMesh 创建的局部坐标系编号进行修改。

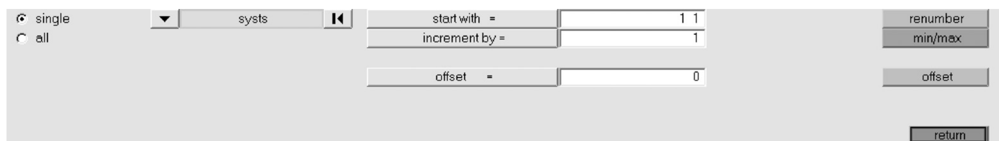


图 16-9 renumber 面板

STEP 5 定义铰链截面

1）在 Utility 选项卡中，单击 Section 按钮，弹出 Section 对话框。

2）单击 New 按钮，弹出 Create Section 对话框。设置 Section name 为 Revolute，Section type 为 JOINT，Sub section type 为 REVO，如图 16-10 所示。

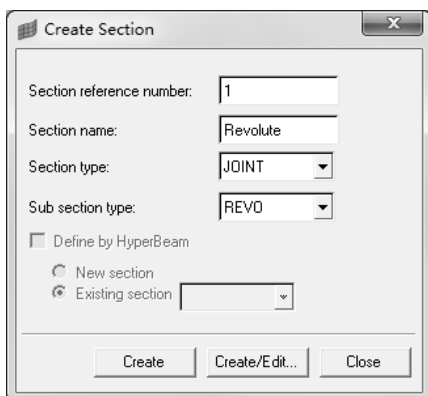


图 16-10 Create Section 对话框

3）单击 Create/Edit 按钮，弹出截面设置卡片。激活 JOINTTYPE，并选择 LSYS，表示为铰链单元定义局部坐标系，val1 设置为 11，表示为铰链单元的 *I* 节点指定局部坐标系编号 11，val2 设置为 11，表示为铰链单元的 *J* 节点指定局部坐标系编号 11，如图 16-11 所示。

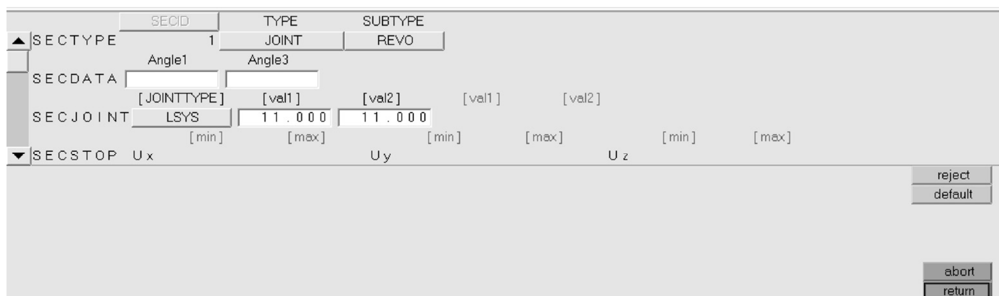


图 16-11 铰链截面设置卡片

4）单击 return 按钮，返回 Create Section 对话框。

5）单击 Close 按钮，退出 Create Section 对话框。

6）单击 Close 按钮，退出 Section 对话框。

STEP 6 材料定义

利用 Utility 选项卡中的 Material 按钮为连杆定义材料，杨氏模量 EX 为 2.1E5MPa，泊松比 NUXY 为 0.3，密度 DENS 为 7.85E−9ton/mm^3，摩擦系数 MU 为 0。

STEP 7 更新组件信息

利用 Utility 选项卡中的 Component Manager 按钮更新组件信息，为 rod 组件、crank 组件、rocker 组件和 revolute 组件赋予相应的单元、实常数、截面和材料。

STEP 8 利用 MPC 算法创建铰链单元 1

铰链单元 1 用于连接曲柄和连杆。4 连杆机构在运动过程中，铰链单元 1 的销轴方向保持不变，采用 MPC 算法（Force−Distributed Constraint）模拟铰链连接是一种简单的方法，详见第 4.4.3 节。

1）利用 HyperMesh Utility 选项卡中的 Contact Manager 工具进入接触向导。

2）单击 New 按钮，弹出 Create New Contact Pair 对话框，将 Creation method 设置为 Pilot node，Contact type 设置为 3D，Create from 设置为 Surface to surface，Pilot node name 设置为 PILOT1，如图 16−12 所示。

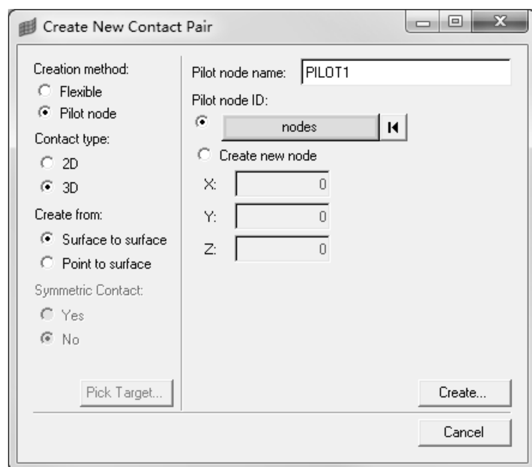


图 16−12　Create New Contact Pair 对话框

3）单击 nodes 按钮，激活节点选择面板。选择图 16−2 中“刚性梁单元”的上部节点，再单击 proceed 按钮，返回 Create New Contact Pair 对话框。

4）单击 Create 按钮，弹出 Target Component Details 对话框，设置 keyopt（2）=1，由用户控制 PILOT 单元的边界条件，keyopt（4）=11111，即放开 ROTZ 自由度，选中 ROTY、ROTX、UZ、UY、UX 自由度，其余选项保持默认设置，如图 16−13 所示。

5）单击 Next 按钮，弹出 Contact Components Selection 对话框，如图 16−14 所示。

6）单击 Components 按钮，选择 rod 组件集，单击 proceed 按钮，返回 Contact Components Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。单击 Next 按钮，弹出 Contact Elements Selection 对话框，如图 16−15 所示。同时，接触体的表面单元被提取出来。

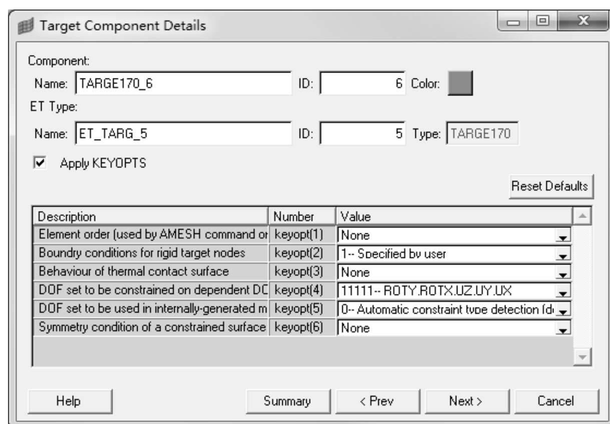


图 16-13　Target Component Details 对话框

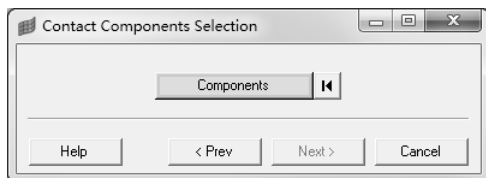


图 16-14　Contact Components Selection 对话框

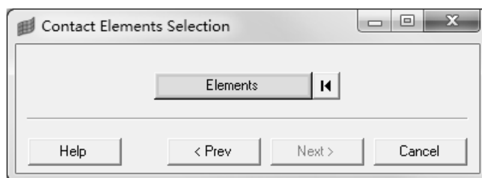


图 16-15　Contact Elements Selection 对话框

7）单击 Elements 按钮，激活接触单元选择面板。选择图 16-2 中连杆左边小孔内部的所有表面单元，之后单击 proceed 按钮，返回 Contact Elements Selection 对话框，此时，Next 按钮被激活。

8）单击 Next 按钮，弹出 Contact component Details 对话框，设置 keyopt（2）=2，keyopt（4）=1，keyopt（5）=1，keyopt（9）=1，keyopt（12）=5，其余选项保持默认设置，如图 16-16 所示。

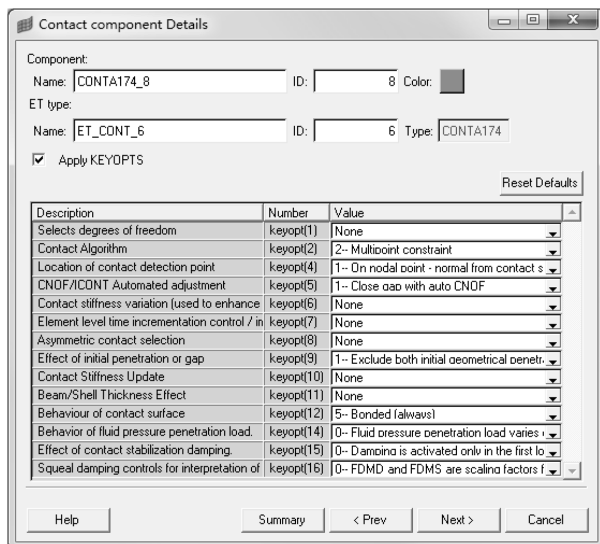


图 16-16　Contact component Details 对话框

9）单击 Next 按钮，弹出 Contact Property 对话框，保持所有默认设置，如图 16-17 所示。

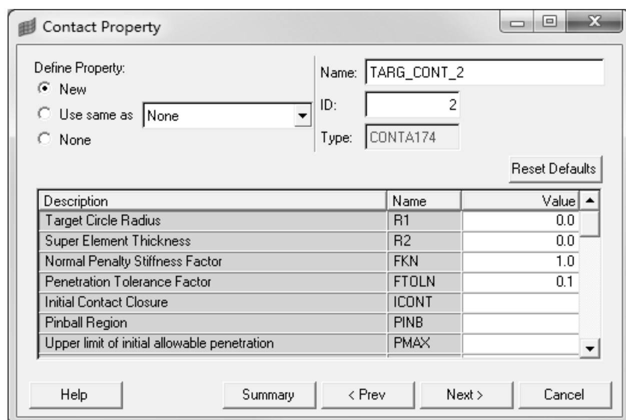


图 16-17　Contact Property 对话框

10）单击 Next 按钮，弹出 Contact Material 对话框。这里选择之前定义的材料，如图 16-18 所示。

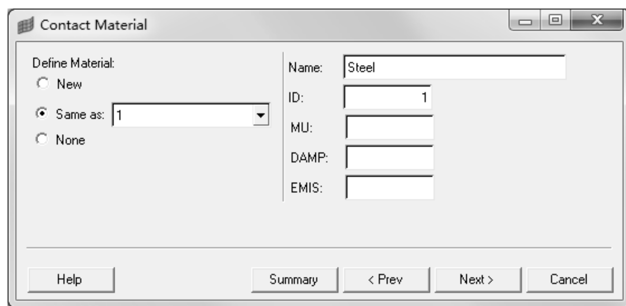


图 16-18　Contact Material 对话框

11）单击 Next 按钮，弹出 Contact/Target Normal 对话框，如图 16-19 所示。同时，显示出接触单元的法向。

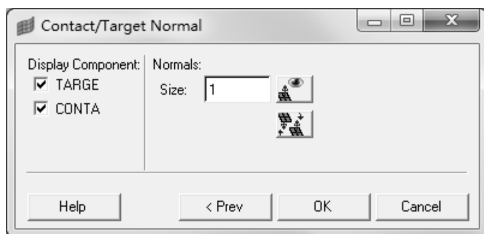


图 16-19　Contact/Target Normal 对话框

必须确保接触单元法向指向 PILOT 点单元，否则，ANSYS 求解器将产生错误。对于本例，无需调整单元法向。

12）单击 OK 按钮，弹出 ANSYS Contact Manager 对话框，完成接触对的创建。图 16-2 中的 PILOT1 和孔边的“接触单元”即为刚才创建的 MPC 算法。

STEP 9 利用铰链单元创建铰链单元 2

铰链单元 2 用于连接摇杆和连杆。与 MPC 算法不同的是，铰链单元的自由度使用局部坐标系定义。载荷和边界条件（命令为 FJ 和 DJ）是通过局部坐标系施加的，这些局部坐标系将跟随节点转动而转动。因此，铰链单元具有更广的适用性。

第 1 步已经创建了铰链单元。铰链单元的 *I* 节点与摇杆连接在一起，但 *J* 节点尚未与摇杆进行关联，这里采用 MPC 算法进行连接。MPC 算法的建模过程与第 8 步相同，但需要注意以下几点：

1）PILOT 点单元应选择铰链单元的 *J* 节点（不与摇杆相连）。

2）对于 TARGE170 单元，应设置 K2=1，K4=111111，即耦合所有自由度。

3）对于 CONTA174 单元，应设置 K2=2，K4=1 或 2，K5=1，K9=1，K12=5。

说明：对于 CONTA174 单元，K4=1 采用分布力约束，K4=2 采用刚性面约束。关于 MPC 算法的详细解释，读者可参阅第 4.1.3 节。

STEP 10 边界条件定义

利用 Analysis 页面中的 constraints 面板，约束曲柄和摇杆底部节点的 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY 自由度，即勾选 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5，并将约束载荷放置于 constraints 载荷集。

STEP 11 修改刚性梁单元 MPC184 的单元选项

1）利用 HyperMesh 的模型输出接口 Export Solver Deck，将模型导出为 4_rod_jointed_mechanism.cdb 文件。利用 ANSYS 打开 4_rod_jointed_mechanism.cdb 文件。

2）如果使用 HyperMesh 12.0 进行前处理，则需要在 ANSYS 前处理器中设置 MPC184 单元的单元选项 K2。GUI 方式为 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，将刚性梁单元 MPC184 的单元选项修改为 K1=1（Rigid beam），K2=1（Lagrange Multiplier）。

STEP 12 求解控制

尽管 HyperMesh 为 ANSYS 提供了部分用于瞬态动力学分析的控制卡片，但它并不便于为瞬态动力学分析设置合适的载荷步。以下借助 ANSYS 界面完成瞬态动力学分析。

1）定义新的分析类型为瞬态动力学分析，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis。如图 16-20 所示为在 New Analysis 对话框中定义新的分析类型。

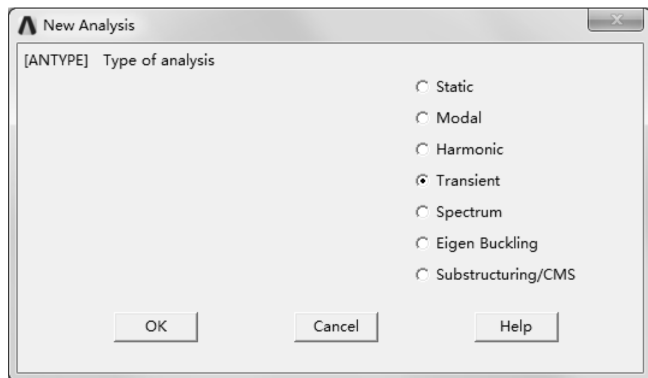


图 16-20 定义新的分析类型为 Transient

2）单击图 16-20 中的 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，保持默认设置，即完全法，单击 OK 按钮，如图 16-21 所示。

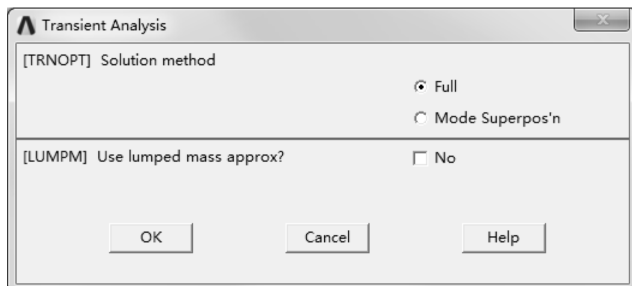


图 16-21　Transient Analysis 对话框

3）设置瞬态动力学分析求解选项，GUI 方式为 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出 Solution Controls 对话框。在 Basic 选项卡中开启大变形效应，设置求解结束时间为 0.5s，开启自动时间步长控制，设置载荷子步为 500，最大载荷子步为 1000，最小载荷子步为 500，指定写入结果文件的项目为 Nodal DOF Solution，Nodal Reaction Loads，Nodal Velocity，Nodal Acceleration，Element Solution，以节省硬盘空间，写入频率为每个子步，如图 16-22 所示。在 Transient 选项卡中开启时间积分效应，采用斜坡载荷加载，设置阻尼系数 BETA=1E-5，如图 16-23 所示。

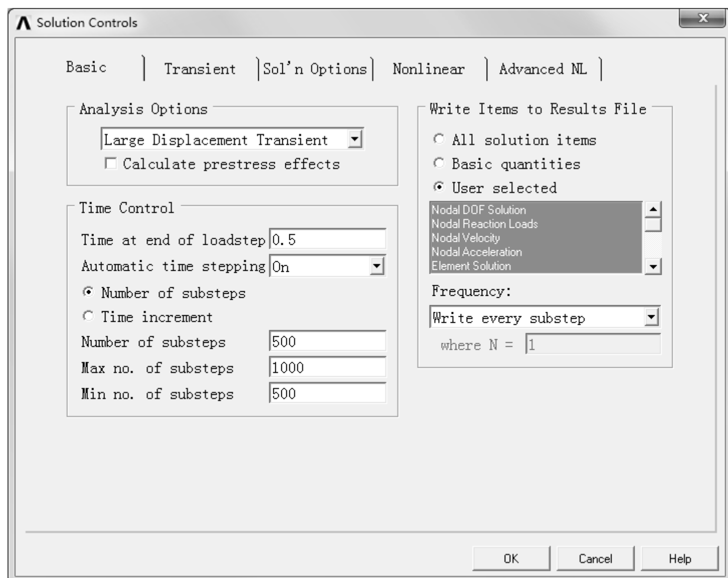


图 16-22　Solution Controls 对话框-Basic 选项卡+

STEP 13 定义角位移表格数据

曲柄由图 16-1 中的初始位置逆时针加速转动，角位移的时间历程为 $8\pi t^2$（单位为 rad），可利用函数进行角位移加载（详见第 10.5 节），但本例采用表格函数加载。

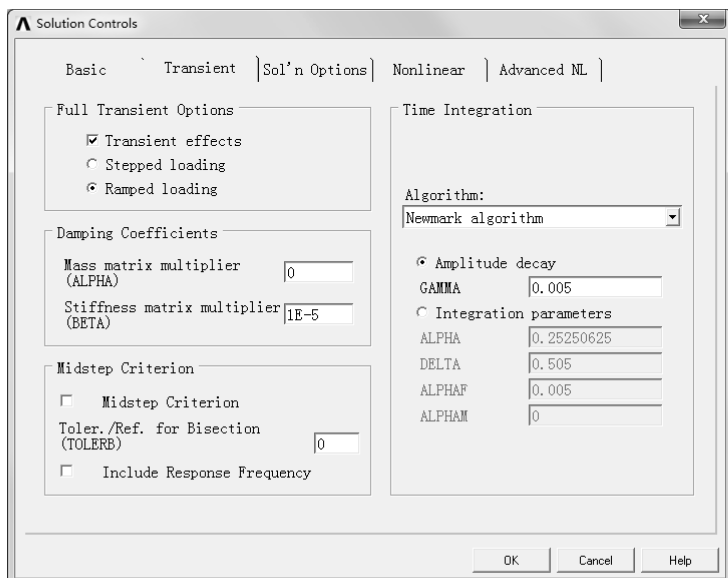


图 16-23　Solution Controls 对话框-Transient 选项卡

1）利用 EXCEL 或 MATLAB 等软件生成角位移-时间历程数据，并保存为 disp.txt 文件，如图 16-24 所示。数据分为两列（通过用 Tab 键或空格分隔），第一列表示时间（单位为 s），第二列表示角位移（单位为 rad）。



图 16-24　位移-时间历程数据

2）定义数组参量，GUI 方式为 Parameters→Array Parameters→Define/Edit，弹出 Array Parameters 对话框，如图 16-25 所示。

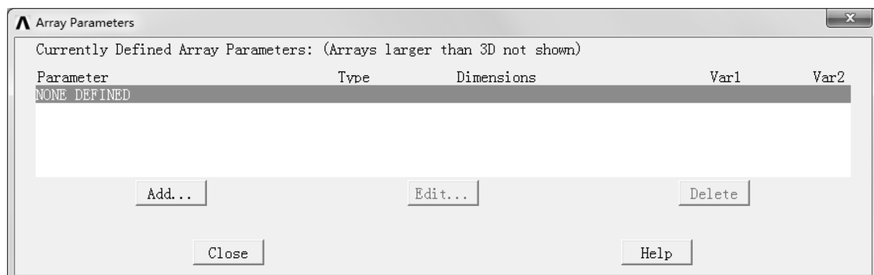


图 16-25　Array Parameters 对话框

3）单击图 16-25 中的 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，设置 Parameter name 为 DISP_ROTZ，Parameter type 为 Table，设置数据为 501 行（disp.txt 中的数据为 501 行），如图 16-26 所示。单击 OK 按钮，返回 Array Parameters 对话框。

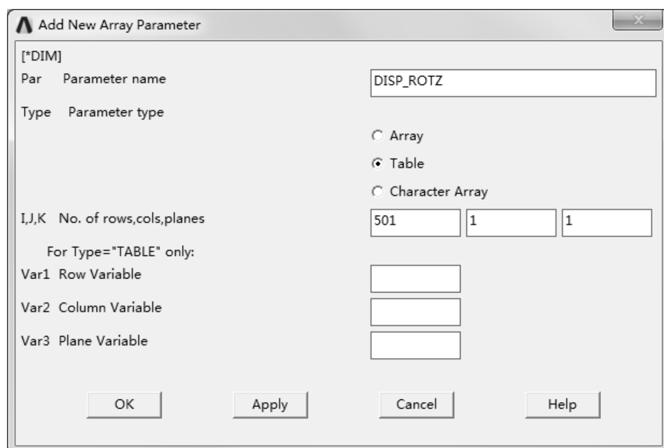


图 16-26 Add New Array Parameter 对话框

4）读入表格数据，GUI 方式为 Parameters→Array Parameters→Read From File，弹出 Read Array Parameter Data from File 对话框，选择 Table（*TREAD）单选按钮，如图 16-27 所示。

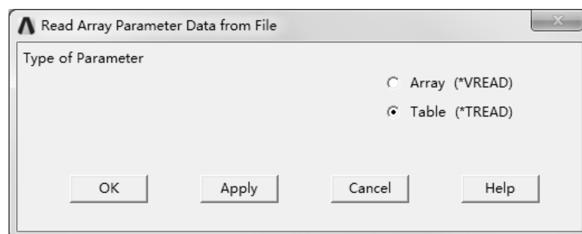


图 16-27 Read Array Parameter Data from File 对话框

5）单击图 16-27 中的 OK 按钮，弹出 Read from file 对话框（见图 16-28），读入文件 disp.txt，单击 OK 按钮，将 disp.txt 文件中的数据赋给数组参量 DISP_ROTZ。利用 Array Parameters 对话框可以查看数组参量 DISP_ROTZ，如图 16-29 所示。

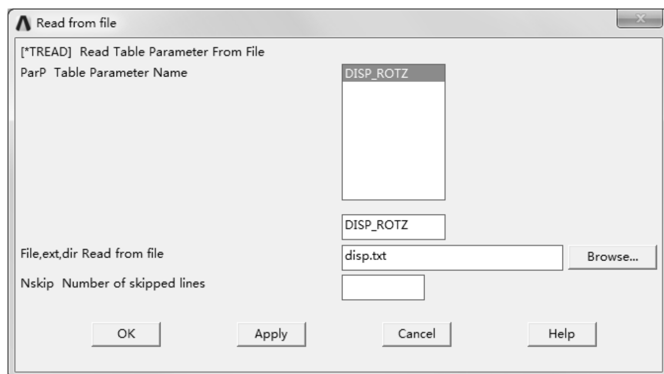


图 16-28 Read from file 对话框

Table Array: DISP_ROTZ = f(Row,Column,Plane)

File Help

Page Increment Full Page

Row \ Column	0
0	0
0.001	2.51327e-00
0.002	0.000100531
0.003	0.00022619
0.004	0.00040212
0.005	0.00062831
0.006	0.00090477
0.007	0.00123150
0.008	0.00160849

图 16-29 角位移载荷数据

STEP 14 施加角位移载荷

1）GUI 方式为 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，选择曲柄底部节点，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，选中 ROTZ 自由度，Apply as 选择 Existing table，如图 16-30 所示。

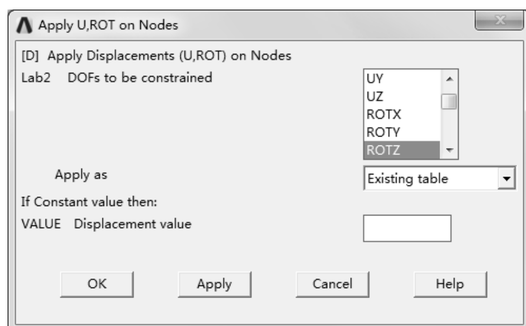


图 16-30 Apply U, ROT on Nodes 对话框 1

2）单击图 16-30 中的 OK 按钮，弹出新的对话框（见图 16-31），选择 DISP_ROTZ，单击 OK 按钮，完成载荷施加。

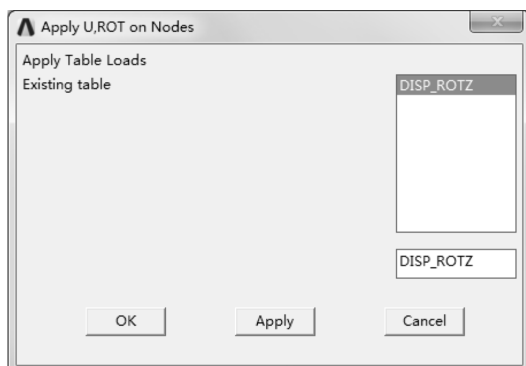


图 16-31 Apply U, ROT on Nodes 对话框 2

STEP 15 求解并查看结果

执行求解命令：

```
/SOLU
SOLVE
```

或者采用 GUI 方式提交求解：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

1）进入时间历程后处理器 POST26，利用 Variable Viewer 定义并绘制曲柄上部节点（记为 *A* 点）和摇杆上部节点（记为 *B* 点）的位移、速度和加速度-时间曲线，如图 16-32～图 16-34 所示。

2）利用 Variable Viewer 定义并绘制连杆左边小孔附近节点的应力-时间曲线，如图 16-35 所示。

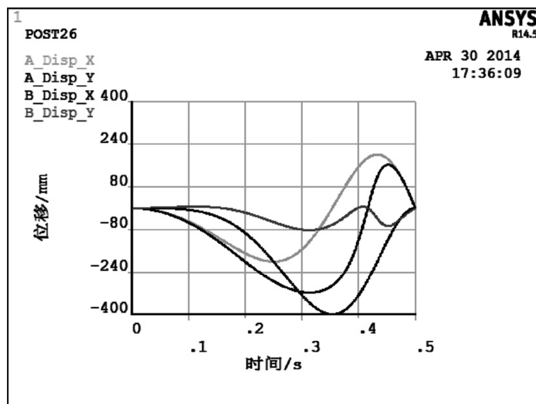


图 16-32 *A* 点和 *B* 点的位移-时间曲线

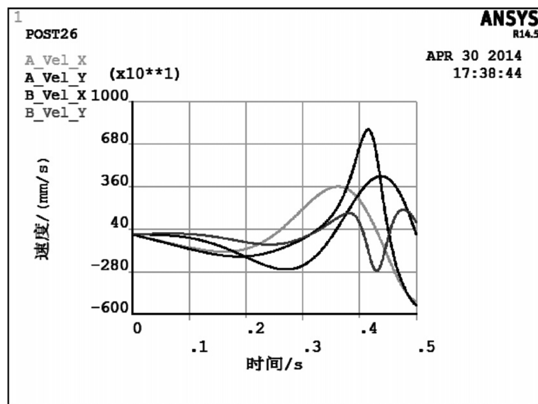


图 16-33 *A* 点和 *B* 点的速度-时间曲线

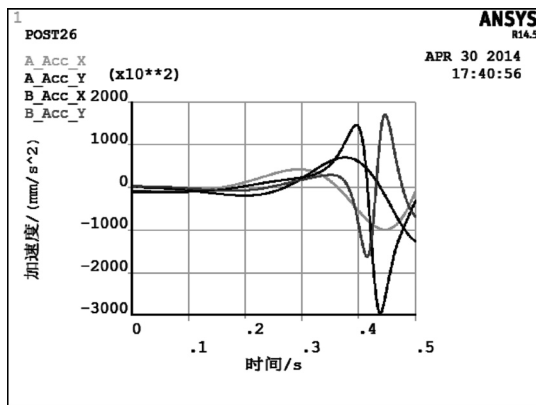


图 16-34 *A* 点和 *B* 点的加速度-时间曲线

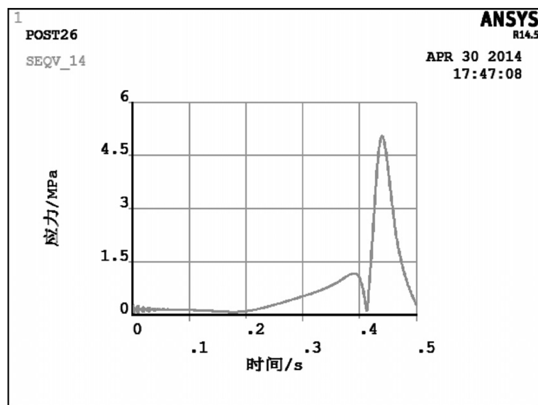


图 16-35 von Mises 应力-时间曲线

3）进入通用后处理器 POST1，查看连杆在各时刻的应力结果，如图 16-36～图 16-40 所示。

由图 16-36～图 16-40 可知，连杆的应力分布随着时间变化而变化。

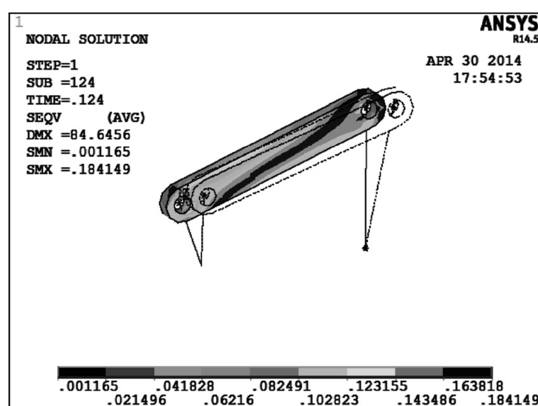


图 16-36 连杆的 von Mises 应力云图（t=0.124s）

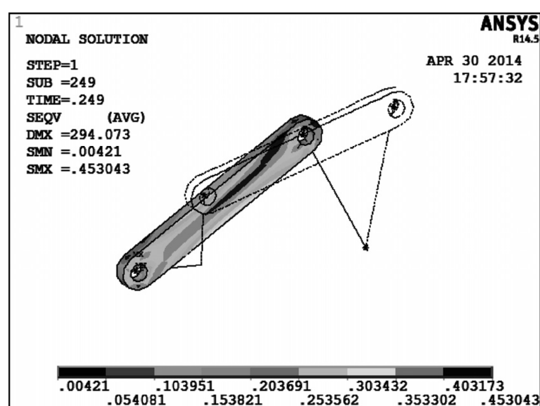


图 16-37 连杆的 von Mises 应力云图（t=0.249s）

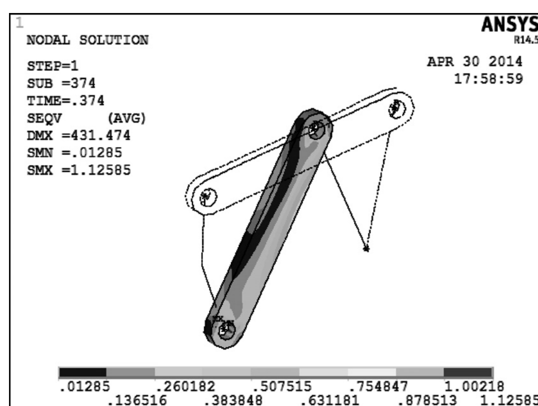


图 16-38 连杆的 von Mises 应力云图（t=0.374s）

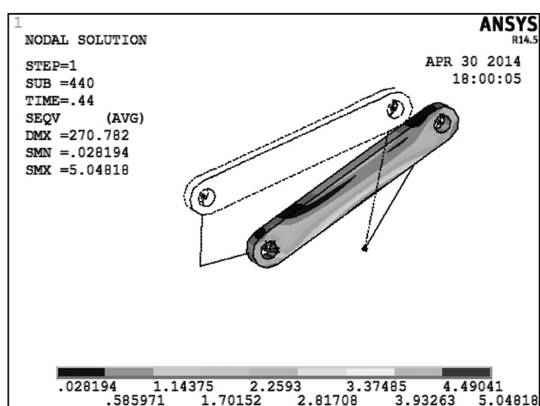


图 16-39 连杆的 von Mises 应力云图（t=0.440s）

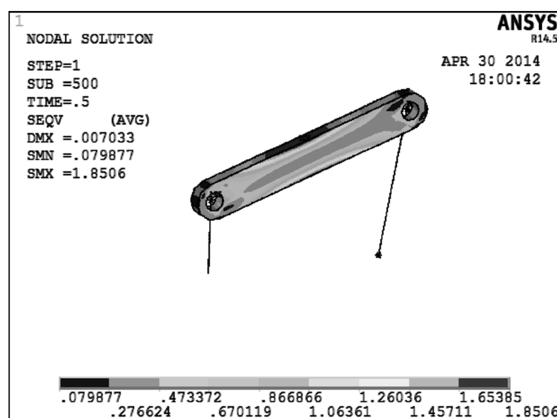


图 16-40 连杆的 von Mises 应力云图（t=0.5s）

16.4　本章小结

1）本章介绍的多体有限元分析技术可用于确定由柔体或刚体组成的多体系统的动力学行为。与多刚体动力学仿真相比，基于有限元分析的多体仿真方法不仅可获得各零部件的运动学信息，更可得到柔性体的应力、应变等关键数据，对于真实模拟多体系统动力学行为具有重要意义。

2）相对于传统的有限元分析技术，多体分析是一种高级技术，难度较大。本章的实例综合利用了实体单元、MPC184 刚性梁单元、TARGE170 刚性单元、MPC 算法、MPC184 铰链单元进行建模。可以看出，多体动力学建模过程比较烦琐，需要耐心和仔细。

3）基于前续章节的内容，本章没有罗列 HyperMesh 和 ANSYS 操作的所有过程，只介绍了关键的建模和计算步骤。

4）多体系统通常经历大转动和大位移，且须考虑瞬态效应，因此须消耗较多的计算资源。



参考文献

[1] Courant R. Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations[J]. Bulletin of the American Mathematical Society. 1943，49: 1-23.

[2] Turner M J，Clough R W，Martin H C，et al. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures[J]. Journal of the Aeronautical Sciences. 1956，23（9）: 805-823.

[3] Clough R W. The Finite Element Method in Plane Stress Analysis[C]. Proc. 2nd ASCE Conference on Electronic Computation. Pittsburgh，PA.，345-378，1960.

[4] 郭乙木，陶伟明，庄茁. 线性与非线性有限元及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社，2003.

[5] 庄茁，由小川，廖剑晖，等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社，2009.

[6] 杜凯. 有限元分析 50 年发展之路. http://articles.e-works.net.cn/CAE/Article77369-1.htm，2010.

[7] ANSYS Inc. ANSYS Release 14.5 Documentation，Element Reference[R]. 2012.

[8] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社，1998.

[9] 杨笑冬. 基于 ANSYS 的悬臂梁模态分析[J]. 机电一体化. 2008（6）: 58-61.

[10] ALTAIR Inc. HyperWorksRelease 12.0Documentation，HyperMesh[R].2013.

[11] 张胜兰，郑冬黎，郝琪，等. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京: 机械工业出版社，2007.

[12] 王钰栋，金磊，洪清泉，等. HyperMesh&HyperView 应用技巧与高级实例[M]. 北京: 机械工业出版社，2012.

[13] Liping He，Limiao Qian，Zijing Wang，et al. Finite Element Modeling and Modal Analysis of Structure with Bolted Joints[J]. Computer Modelling & New Technologies. 2014.

[14] ANSYS Inc. ANSYS Release 14.5 Documentation，Basic Analysis Guide[R]. 2012.

[15] ANSYS Inc. ANSYS Release 14.5 Documentation，Structural Analysis Guide[R]. 2012.

[16] 李晓雷，俞德孚，孙逢春. 机械振动基础[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社，2010.

[17] Clough R，Penzien J. 结构动力学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社，2010.

[18] 许本文，焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社，1998.

[19] 尚晓江，邱峰，赵海峰，等. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社，2006.

[20] 贺李平，顾亮，辛国国，等. 减振器环形阀片大挠曲变形的高精度解析式[J]. 北京理工大学学报. 2009，29（6）: 510-514.

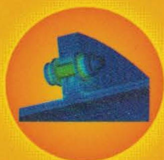
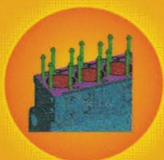
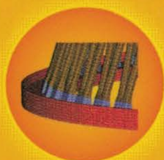
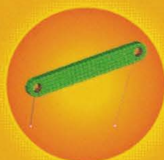
[21] 郑晓静. 圆薄板大挠度理论及应用[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社，1990.

[22] 王仁，黄文彬，黄筑平. 塑性力学引论[M]. 北京: 北京大学出版社，2003.

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
官方博客：http://blog.sina.com.cn/cmpbookjsj
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

ANSYS系列已出版

- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

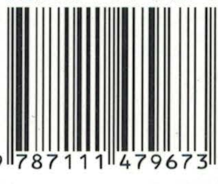
地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-47967-3
策划编辑◎张淑谦/封面设计◎

扫一扫加入微信公众平台
更多、更快获取最新图书资讯



ISBN 978-7-111-47967-3



定价：59.80元（含1CD）